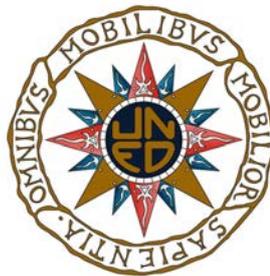


UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática
Departamento de Ingeniería de Software y Sistemas Informáticos



**GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE MODELOS 3D
CON ESCÁNERES Y TECNOLOGÍAS
INTELIGENTES**

TESIS DOCTORAL

Enrique Valero Rodríguez

Ingeniero Industrial

2013

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática
Departamento de Ingeniería de Software y Sistemas Informáticos



GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE MODELOS 3D CON ESCÁNERES Y TECNOLOGÍAS INTELIGENTES

Memoria que presenta para optar al grado de Doctor

Enrique Valero Rodríguez

Ingeniero Industrial por la Universidad de Castilla-La Mancha

Directores:

Carlos Cerrada Somolinos

Catedrático de Universidad del Departamento de Ingeniería de Software y Sistemas
Informáticos de la Universidad Nacional de Educación a Distancia

Antonio Adán Oliver

Profesor Titular de Universidad del Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Electrónica, Automática y Comunicaciones de la Universidad de Castilla-La Mancha

A mis padres

...se sentía poco menos que doctorado
en ciencias químicas cuando les prendía
fuego a las ocho pajuelas cuya misión
era azufrar una tinaja.

FÉLIX GRANDE, *La balada del abuelo Palancas*

Agradecimientos

Me gustaría, en primer lugar, dar las gracias a mis directores de tesis, Antonio Adán y Carlos Cerrada. Muchas gracias por iniciarme en el mundo de la investigación y sobre todo por vuestra ayuda y confianza.

También me gustaría agradecer su ayuda, y tantos buenos momentos, a mis compañeros del *3D Visual Computing and Robotics Lab*, de la Universidad de Castilla-La Mancha.

Gracias a mis padres y a mi hermana, por su ejemplo y apoyo. Vosotros me habéis llevado hasta aquí. Gracias a mis abuelos, por sus consejos y su cariño. A mi abuela María, *in memoriam*, por enseñarme las primeras letras. A toda mi familia. Y por supuesto, gracias a ti, Mari Paz, por tu amor y paciencia infinitos.

Muchas gracias a mis amigos y a todos los que habéis hecho posible este trabajo. Una tesis no es solo el trabajo presentado en este documento, también es una parte de la vida. Así, todos formáis parte de ella.

Resumen

La obtención de modelos de información de edificios habitados a partir de escáneres láser constituye una línea de investigación emergente en el ámbito de la ingeniería inversa. La generación de estos modelos se ha llevado a cabo durante los últimos años de una forma manual, lo que supone un trabajo complejo y tedioso y pone de manifiesto la necesidad de buscar la automatización de este proceso.

En esta tesis se presenta un trabajo dedicado a la reconstrucción automática de escenarios interiores. En primer lugar se han procesado nubes de puntos obtenidas mediante escáneres láser desde ubicaciones estratégicas en diferentes escenarios, con el objetivo de segmentar las paredes y proporcionar modelos 3D de representación de contorno (o *B-Rep*), en los cuales se establece una relación entre los diferentes elementos constructivos identificados en un edificio: muros, suelos, techos, columnas, puertas y ventanas.

Pero, además de estos componentes de tipo constructivo, las habitaciones contienen en su interior una serie de elementos de mobiliario básico que también es preciso reconocer y ubicar. Durante los últimos años se han desarrollado para este fin diferentes algoritmos de identificación y posicionamiento 3D de objetos en entornos interiores. Sin embargo, estos procesos suelen ser complejos, computacionalmente costosos y de resultados poco precisos. En la tesis se proponen soluciones más flexibles y originales a este problema, planteadas a partir de la combinación de escáneres láser con tecnologías inteligentes. Más concretamente, se han utilizado sistemas de identificación por radio frecuencia (RFID). Mediante la utilización de este tipo de sistemas puede obtenerse información relacionada con la geometría de las piezas de mobiliario, a través de la lectura de un conjunto de etiquetas RFID que, adheridas a los muebles, almacenan estos datos. El procesamiento de esta información facilita, en gran medida, la identificación y el posicionamiento de estos elementos en una nube de puntos.

A partir de esta propuesta se lleva a cabo un detallado análisis de diferentes entornos, así como una evaluación en profundidad de los resultados logrados en cada uno de ellos. Del trabajo desarrollado se concluye que los modelos 3D obtenidos de forma automática, a través de la técnica mixta escáner-RFID, poseen una precisión aceptable y podrían ser utilizados para otros procesos posteriores relacionados con el conocimiento de un escenario.

Abstract

The automatic generation of building information models with laser scanners is an emergent research line in the reverse engineering field. The creation of this kind of models has been made by hand during the last years, leading to suppose a complex and tedious work. Therefore, the automation of this process is an interesting challenge.

In this thesis, a work focused on the automatic reconstruction of inhabited interiors is presented. Firstly, 3D point clouds, which are acquired from strategic positions, are processed in order to identify and pose the structural components of the scene. Then, a boundary representation (B-Rep) model is created. These models contain the location and relationships of structural elements of inhabited scenarios such as walls, ceilings, floors, columns, doors and windows.

The scene, enclosed by the calculated B-Rep model, is also composed of a set of basic pieces of furniture. These “non-permanent” elements, which can be relocated or removed in the scene, are also identified and positioned. Some authors have developed different algorithms in order to localize objects in interior environments. However, these processes (mainly based on Computer Vision) are complex, computationally expensive and the results are unaccurate. In this dissertation, a more flexible and novel solution to this problem is proposed, combining laser scanners and radio-frequency identification (RFID) technologies. The general strategy consists of carrying out a selective and sequential segmentation of the point cloud by means of different algorithms which depend on the information that the RFID tags provide. These tags, attached to pieces of furniture, store geometrical information of the objects, making the identification and positioning of basic elements in the scene faster and easier.

This method has been tested in real scenes yielding promising results. An in depth assessment has been performed, analyzing how reliably these elements can be detected and how accurately they are modeled. Finally, we can conclude that this proposal yields accurate 3D models which may be used for further purposes related to the scene understanding.

Índice

| | |
|--|----------|
| Índice de figuras | III |
| Índice de tablas | XI |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Objetivos de la tesis y metodología de trabajo | 2 |
| 1.2. Marco de realización | 5 |
| 1.3. Estructura de la tesis | 6 |
| 2. Estado del arte | 9 |
| 2.1. Procesamiento de datos masivos 3D | 9 |
| 2.1.1. Introducción. Campos de aplicación | 9 |
| 2.1.2. Procesamiento de entornos de la construcción | 12 |
| 2.1.2.1. Modelado de información para la construcción . . | 14 |
| 2.1.2.2. Métodos para la creación de modelos BIM | 15 |
| 2.1.2.3. Huecos/Oclusiones | 17 |
| 2.2. Procesamiento de datos RFID | 18 |
| 2.2.1. Introducción | 18 |
| 2.2.2. La tecnología RFID en las fases previas al proceso cons- tructivo | 20 |
| 2.2.2.1. Planificando la implementación de sistemas RFID en la industria de la construcción | 21 |
| 2.2.2.2. Fabricación de componentes constructivos y cade- na de suministro | 22 |
| 2.2.3. Control del proceso constructivo usando tecnologías RFID | 23 |
| 2.2.3.1. Sistemas de tracking | 23 |
| 2.2.3.2. Monitorización de la obra | 26 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 2.2.4. | Seguridad durante el ciclo de vida del edificio | 27 |
| 2.2.5. | Evaluación y mantenimiento de edificios | 28 |
| 2.2.6. | Otras aplicaciones en interiores | 29 |
| 2.2.6.1. | Localización y mapeo | 29 |
| 2.2.6.2. | Navegación | 31 |
| 2.3. | Integración de tecnología RFID con diferentes sensores en el ámbito de la construcción | 31 |
| 2.3.1. | RFID con diferentes sensores | 33 |
| 2.3.2. | RFID con visión por computador | 34 |
| 2.4. | Conclusiones del capítulo | 35 |
| 3. | Tecnologías utilizadas | 37 |
| 3.1. | Escáneres láser | 37 |
| 3.1.1. | Tiempo de vuelo | 38 |
| 3.1.1.1. | Riegl VZ-400 | 39 |
| 3.1.2. | Cambio de fase | 44 |
| 3.1.2.1. | Faro Photon 80 | 46 |
| 3.2. | Sensores RFID | 49 |
| 3.2.1. | Lector FEIG OBID LRU 3500 | 51 |
| 3.2.1.1. | Antena ID ISC.ANT.U270/270-EU | 53 |
| 3.2.1.2. | Etiquetas | 53 |
| 3.3. | Integración de tecnologías | 53 |
| 3.4. | Conclusiones del capítulo | 55 |
| 4. | Modelo BIM: Estructuras básicas de interiores | 57 |
| 4.1. | Introducción | 57 |
| 4.2. | Determinación de las estructuras de contorno | 59 |
| 4.2.1. | Segmentación de suelo y techo | 59 |
| 4.2.1.1. | Resultados en la segmentación de suelo y techo | 62 |
| 4.2.2. | Segmentación de paredes | 64 |
| 4.2.2.1. | Habitaciones de planta rectangular | 65 |
| 4.2.2.2. | Habitaciones de planta arbitraria | 66 |
| 4.2.3. | Creación de modelos B-Rep del contorno | 68 |
| 4.3. | Determinación de huecos enmarcados en estructuras de contorno | 72 |
| 4.3.1. | Etapas a seguir | 73 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 4.3.1.1. | Transformación de puntos 3D a una imagen binaria I_0 | 73 |
| 4.3.1.2. | Determinación de segmentos mínimos de molduras en I_0 | 74 |
| 4.3.1.3. | Agrupamiento de segmentos mínimos de molduras en la misma dirección | 78 |
| 4.3.1.4. | Determinación de regiones enmarcadas | 78 |
| 4.3.2. | Identificación del tipo de molduras en el entorno de elementos estructurales huecos | 82 |
| 4.3.2.1. | Determinación del eje del molde | 82 |
| 4.3.2.2. | Segmentación del molde | 86 |
| 4.4. | Determinación de huecos no enmarcados | 94 |
| 4.4.1. | Huecos correspondientes a vanos sin enmarcar | 94 |
| 4.4.2. | Huecos debidos a la falta de datos 3D | 95 |
| 4.5. | Determinación de otros elementos: columnas | 96 |
| 4.5.1. | Ajuste de la base de una columna a una circunferencia | 99 |
| 4.5.2. | Ajuste de la base de una columna a un rectángulo | 102 |
| 4.5.3. | Posicionamiento del modelo de una columna en la escena | 103 |
| 4.6. | Creación de modelos B-Rep estructurales | 104 |
| 4.7. | Conclusiones del capítulo | 106 |
| 5. | Modelo BIM: Elementos no permanentes en interiores | 109 |
| 5.1. | Visión general de la técnica | 109 |
| 5.2. | Gestión de la información almacenada en etiquetas RFID | 110 |
| 5.2.1. | Codificación | 112 |
| 5.2.2. | Escritura | 114 |
| 5.2.3. | Lectura | 115 |
| 5.2.4. | Decodificación | 116 |
| 5.3. | Reconocimiento de objetos tipo “Mesa” | 117 |
| 5.3.1. | Segmentación de tableros de mesas | 117 |
| 5.3.2. | Reconocimiento y posicionamiento aproximado | 118 |
| 5.3.3. | Posicionamiento del modelo 3D tipo “Mesa” en la escena | 123 |
| 5.4. | Reconocimiento de objetos tipo “Silla” | 124 |
| 5.4.1. | Patrones discretos | 128 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 5.4.2. | Patrones continuos | 131 |
| 5.4.3. | Ajuste del modelo 3D de las sillas a la nube de puntos . . . | 133 |
| 5.5. | Reconocimiento de objetos tipo “Armario” | 135 |
| 5.6. | Reconocimiento de objetos tipo “Papelera” | 141 |
| 5.7. | Conclusiones del capítulo | 143 |
| 6. | Resultados experimentales | 145 |
| 6.1. | Introducción | 145 |
| 6.1.1. | Entornos de actuación | 145 |
| 6.1.2. | Tecnologías empleadas | 147 |
| 6.1.3. | Adquisición de la información | 148 |
| 6.1.4. | Registro de nubes de puntos | 149 |
| 6.1.4.1. | Correspondencia de reflectores | 150 |
| 6.1.4.2. | Transformación rígida de dos nubes de puntos corres- pondientes | 156 |
| 6.1.4.3. | Ajuste fino entre nubes de puntos de la escena . . . | 158 |
| 6.1.5. | Creación de una base de datos de modelos 3D de objetos no permanentes | 159 |
| 6.2. | Entorno 1 | 162 |
| 6.2.1. | Resultados para la segmentación de paredes y generación de modelos B-Rep | 162 |
| 6.2.1.1. | Ajuste de paredes mediante planos | 162 |
| 6.2.1.2. | Estudio del B-Rep generado | 167 |
| 6.2.2. | Elementos no permanentes | 170 |
| 6.2.2.1. | Evaluación de reconocimiento | 171 |
| 6.2.2.2. | Evaluación de posicionamiento | 173 |
| 6.2.3. | Modelo 3D del entorno | 174 |
| 6.3. | Entorno 2 | 174 |
| 6.3.1. | Resultados para la segmentación de paredes y generación de modelos B-Rep | 175 |
| 6.3.1.1. | Ajuste de paredes mediante planos | 175 |
| 6.3.1.2. | Estudio del B-Rep generado | 177 |
| 6.3.2. | Elementos no permanentes | 180 |
| 6.3.2.1. | Evaluación de reconocimiento | 182 |

| | |
|--|------------|
| 6.3.2.2. Evaluación de posicionamiento | 183 |
| 6.3.3. Modelos 3D del entorno | 185 |
| 6.4. Entorno 3. Experimentación sobre un robot móvil | 187 |
| 6.4.1. Sistema: Escáner-RFID-Robot | 187 |
| 6.4.2. Modo de actuación | 189 |
| 6.4.3. Espacios estudiados | 190 |
| 6.4.4. Resultados para la segmentación de paredes y generación de modelos B-Rep | 192 |
| 6.4.4.1. Ajuste de paredes mediante planos | 192 |
| 6.4.4.2. Estudio del B-Rep generado | 194 |
| 6.4.5. Elementos no permanentes | 208 |
| 6.4.5.1. Evaluación de reconocimiento | 211 |
| 6.4.5.2. Evaluación de posicionamiento | 212 |
| 6.4.6. Modelos 3D del entorno | 214 |
| 6.5. Conclusiones del capítulo | 217 |
| 7. Conclusiones y futuras líneas de investigación | 219 |
| 7.1. Conclusiones | 219 |
| 7.2. Aportaciones de la tesis | 220 |
| 7.3. Publicaciones | 222 |
| 7.4. Mejoras y líneas de trabajo futuras | 224 |
| 7B.Conclusions and Future Research | 227 |
| 7B.1.Conclusions | 227 |
| 7B.2.Contributions | 228 |
| 7B.3.Publications | 230 |
| 7B.4.Future Research and Improvements | 232 |
| Bibliografía | 235 |

Índice de figuras

| | | |
|-------|---|----|
| 2.1. | Diagrama de flujo del ciclo de vida de un edificio. | 20 |
| 2.2. | Localización de lectores (izquierda) y etiquetas (derecha)(34). . . | 25 |
| 3.1. | Esquema de funcionamiento de un escáner de tiempo de vuelo. . . | 38 |
| 3.2. | Escáner Riegl VZ-400. | 39 |
| 3.3. | Soporte sobre el que se monta el escáner. | 40 |
| 3.4. | Esquema de conexión y funcionamiento del Riegl VZ-400. | 41 |
| 3.5. | Rango de medida del Riegl VZ-400. | 42 |
| 3.6. | Esquema de funcionamiento de un escáner de cambio de fase. . . . | 44 |
| 3.7. | Ambigüedad en la medida de cambio de fase. | 45 |
| 3.8. | Escáner Faro Photon 80. | 46 |
| 3.9. | Esquema de conexión y funcionamiento del Faro Photon 80. . . . | 47 |
| 3.10. | Rango de trabajo del Faro Photon 80. | 47 |
| 3.11. | Ejemplo de un sistema RFID. | 49 |
| 3.12. | Lector FEIG OBID LRU 3500 y antena UHF. | 51 |
| 3.13. | Sistema propuesto en esta tesis, donde se combinan tecnologías de visión 3D y RFID. | 54 |
| 4.1. | Diagrama de bloques de la segmentación de elementos estructurales. | 58 |
| 4.2. | Representación del espacio voxelizado. | 61 |
| 4.3. | a) Datos simulados del interior de una habitación. Proyección en el plano YZ. b) Discretización final del espacio. Las franjas azul y roja contienen la mayoría de los puntos del suelo y el techo. | 64 |
| 4.4. | Segmentación real. Nube de puntos sensada en una habitación y puntos segmentados, correspondientes al techo (cian) y al suelo (rojo). | 64 |
| 4.5. | Segmentación de paredes en una habitación rectangular. | 65 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.6. | Segmentacion de techo y suelo en una habitación de planta arbitraria. | 66 |
| 4.7. | Procesos de la segmentación de paredes. a) Visualización de la nube de puntos desde un punto de vista cenital. b) Imagen binaria generada después de la discretización. c) Detección de la frontera. d) Definición de lados y vértices. | 67 |
| 4.8. | Segmentación de datos correspondientes a las paredes. | 70 |
| 4.9. | a) Planos ajustando las paredes. Nótese que los planos (en rojo) no representan las paredes, sino los planos. Simplemente se usan para ilustrar las intersecciones entre planos. b) Vértices etiquetados de una habitación. c) Relación topológica entre los elementos en la habitación mostrada en a) y b). | 71 |
| 4.10. | Datos 3D correspondientes a una pared sensada. | 72 |
| 4.11. | a) Identificación de zonas vacías en la pared. b) Representación discretizada de zonas vacías en la pared (en verde) y proyección de puntos 3D de la pared (en rojo). | 73 |
| 4.12. | Binarización de la imagen de zonas vacías de la pared y determinación de contornos de la imagen. | 74 |
| 4.13. | a) Contorno seleccionado del conjunto total de cadenas. b) Conjuntos de píxeles consecutivos (vertical y horizontal). c) Ejemplos de segmentos mínimos recuperados. | 75 |
| 4.14. | a) Segmento mínimo candidato a molde. b) Proyección del segmento mínimo. c). Discretización de la proyección para la identificación de zonas compactas. d) Proyección de las zonas compactas de un segmento mínimo. | 76 |
| 4.15. | a) Perfil considerado parte de una moldura. b) Perfil que no cumple la condición de moldura. | 77 |
| 4.16. | a) Centroides de los candidatos a molde. b) Líneas en las que se encuentran los candidatos. c) Segmentos mínimos. d) Ubicación de los perfiles en la región discretizada | 79 |
| 4.17. | Representación de los segmentos determinados en el proceso anterior. | 79 |
| 4.18. | a) Segmentos y píxeles vacíos del entorno de la pared. b) Regiones de búsqueda determinadas. | 80 |
| 4.19. | Región que engloba un hueco. a) Segmentos y píxeles vacíos. b) Semilla y límites de búsqueda. | 81 |

| | |
|---|----|
| 4.20. a) Huecos detectados en una pared bajo estudio. b) Datos 3D pertenecientes a los marcos que rodean los huecos. c) Polígonos que definen los huecos enmarcados. | 81 |
| 4.21. a) Ejemplo de perfiles de una ventana alineados (izquierda) y desalineados (derecha) con la vertical. b) Nube de puntos contenidos en una pequeña capa horizontal. c) Perfiles del molde en los planos que delimitan la capa. | 83 |
| 4.22. Pared bajo estudio donde se muestra la ROI ampliada. | 84 |
| 4.23. Distintas perspectivas del plano correspondiente al marco de una ventana. | 84 |
| 4.24. Histograma 2D correspondiente a una capa en la ROI. | 85 |
| 4.25. Estudio de la máxima correlación para obtener el eje de la moldura. | 86 |
| 4.26. Desplazamiento de una capa para diferentes estudios de correlación. | 86 |
| 4.27. Esquema del proceso de interpolación. | 87 |
| 4.28. a) Histograma 2D ponderado. b) Imagen I y obtención de la línea del perfil $f(x)$ | 88 |
| 4.29. Definición de la función $h(x)$ | 89 |
| 4.30. Ejemplo de imagen S con las regiones de moldes segmentadas. | 89 |
| 4.31. Descriptor del perfil de un molde detectado en una nube de puntos. | 91 |
| 4.32. Parejas de perfiles similares en la base de modelos junto con su descriptor de forma. | 93 |
| 4.33. Clasificación de una moldura extraída de la nube de puntos. a) Superposición de los descriptores de firma de la moldura y del prototipo de clase. b) Región de molde y región prototipo de la clase asignada. | 93 |
| 4.34. Ajuste de perfiles para tres huecos detectados en paredes sensadas. | 94 |
| 4.35. Hueco no enmarcado. | 95 |
| 4.36. Oclusiones en una pared debidas a la presencia de mobiliario. | 96 |
| 4.37. Vistas cenital (a) y en perspectiva (b) de los datos 3D del interior de una habitación, habiendo sustraído los datos pertenecientes a muros. c) División de la nube de puntos 3D en franjas. | 97 |
| 4.38. a) Píxeles ocupados en la parte superior de la habitación. b) Segmentos candidatos a contener una columna. c) Nube de puntos de un escenario bajo estudio. En azul, las dos columnas presentes. | 99 |

| | |
|---|-----|
| 4.39. Parámetros de la circunferencia. | 101 |
| 4.40. Ajuste de la sección de una columna cuadrada mediante una circunferencia. | 102 |
| 4.41. Ajuste de la sección de la columna 1 mediante un rectángulo. | 103 |
| 4.42. Inclinación del eje de la columna respecto a la vertical. | 104 |
| 4.43. Modelos 3D de columnas posicionados en la escena. a) Vista cenital. b) Vista en perspectiva. | 105 |
| 4.44. Relación topológica entre elementos estructurales. a) Puntos característicos de los componentes. b) Relación entre caras y el resto de elementos constructivos. | 106 |
| 5.1. Diagrama de bloques de la identificación y posicionamiento de elementos no permanentes. | 110 |
| 5.2. Proceso de gestión de la información. | 112 |
| 5.3. Ventana del software empleado para la modificación del contenido de las etiquetas. | 115 |
| 5.4. Diagrama de flujo explicativo del proceso de lectura. | 116 |
| 5.5. Almacenamiento de los datos relativos a cada objeto etiquetado. | 117 |
| 5.6. a) Imagen binarizada de una sección de datos 3D. b) Segmentos candidatos a mesa. c) Puntos 3D (en azul) ubicados en uno de los segmentos extraídos. | 119 |
| 5.7. Evaluación del ángulo entre normales y eje Z . a) Histograma. b) Evaluación por centroides. c) Direcciones normales para diferentes regiones del tablero. | 121 |
| 5.8. Contornos de modelo (a) y de candidato (b) a mesa y conjuntos de puntos del modelo (c) y del candidato (d) a ajustar mediante el algoritmo ICP. | 122 |
| 5.9. Ajuste entre modelo del tablero y los datos escaneados mediante un algoritmo ICP. Posiciones inicial (a) y final (b). | 122 |
| 5.10. Modelo de mesa ajustado a la nube de puntos. | 124 |
| 5.11. Ejemplos de patrones de patas de silla. a) Patrón discreto. b) Patrón continuo. | 126 |
| 5.12. Sección de la nube de puntos adyacente al suelo. | 126 |
| 5.13. Proceso de filtrado de la sección bajo estudio. | 128 |

| | |
|--|-----|
| 5.14. a) Segmentos extraídos de la binarización de la sección filtrada anteriormente. b) Segmentos candidatos a formar parte de una silla de patrón discreto pentagonal. c) Segmentos pertenecientes a cada silla. | 130 |
| 5.15. Modelo de patrón discreto pentagonal. | 130 |
| 5.16. Modelo de patrón tipo 2. | 131 |
| 5.17. a) Segmentos candidatos a formar parte de una silla con patrón discreto cuadrangular. b) Segmentos pertenecientes a la silla identificada. | 132 |
| 5.18. a) Modelo de patrón tipo continuo. b) Ajuste del modelo al segmento de tipo continuo. | 133 |
| 5.19. Conjunto de sillas identificadas en la habitación. | 133 |
| 5.20. Posiciones iniciales del modelo (en verde) para los procesos de ajuste. | 134 |
| 5.21. Modelos ajustados a una nube de puntos. | 134 |
| 5.22. Proceso de obtención de las regiones donde se ubican los armarios. a) Sección por encima de la altura del armario. b) Sección por debajo de la altura del armario y c) Resta de imágenes binarias. | 136 |
| 5.23. Nube de puntos del entorno de la región segmentada. a) Vista en perspectiva. b) Vista cenital. | 137 |
| 5.24. Histogramas según los ejes X (a) e Y (b) de un plano cenital de la nube de puntos del entorno del armario. c) Paredes del armario segmentadas y normales de cada conjunto de puntos. | 138 |
| 5.25. Modelo del armario identificado a partir de una etiqueta RFID. | 138 |
| 5.26. a) Traslación del modelo virtual. b) Rotación del modelo. | 139 |
| 5.27. Ajuste de las dos nubes de puntos. | 140 |
| 5.28. Proceso de posicionamiento de un objeto de tipo “papelera”. a) Imagen binaria de una sección por encima de la altura de la papelera. b) Imagen binaria de una sección bajo dicha altura. c) Resta de las imágenes. d) Datos 3D del segmento. e) Ajuste de los datos a un perfil circular. f) Papeleras identificadas y posicionadas en un entorno. | 142 |
| 6.1. Imágenes del laboratorio bajo estudio. | 146 |
| 6.2. Imágenes del salón bajo estudio. | 146 |

| | |
|---|-----|
| 6.3. Imágenes de los entornos bajo estudio en el aula. | 147 |
| 6.4. Diagrama de bloques del proceso de adquisición de datos. | 149 |
| 6.5. Ejemplo de escenario con oclusiones. | 150 |
| 6.6. Diversos escaneos de la misma habitación. | 150 |
| 6.7. a) Localización de reflectores en un escenario. b) Zonas de alta reflectancia (en verde) en una nube de puntos. c) Reflectores cilíndricos empleados para el registro de tomas. | 152 |
| 6.8. Transformación realizada sobre un conjunto de puntos de referencia. | 153 |
| 6.9. Parámetros que definen el reflector cilíndrico. | 154 |
| 6.10. Ajuste de un conjunto de puntos de alta reflectancia a un cilindro. | 154 |
| 6.11. a) Conjunto de referencia P_1 . b) Conjunto de referencia P_2 . c) Registro de P_1 y P_2 bajo un mismo UCS. | 155 |
| 6.12. Orden en el cual se generan los cilindros ajustados. | 156 |
| 6.13. Transformación aproximada entre dos nubes de puntos. | 158 |
| 6.14. Distintas vistas de un registro preciso de tres nubes de puntos de una escena interior. | 159 |
| 6.15. Diferentes modelos 3D almacenados en la base de datos: armarios, sillas y mesas. | 160 |
| 6.16. Proceso de división de facetas. | 160 |
| 6.17. Modelos 3D CAD y vértices de modelos triangulares de objetos virtualizados. a) Modelo 3D silla. b) Vértices de modelo triangular silla. c) Modelo 3D mesa. d) Vértices de modelo triangular mesa. | 161 |
| 6.18. Plano del Laboratorio de Realidad Virtual. | 162 |
| 6.19. Desviación de los puntos de las paredes del laboratorio a los planos de ajuste. (Los mapas de color están codificados en centímetros). | 165 |
| 6.20. Imagen planar del laboratorio. | 166 |
| 6.21. a) Modelo B-Rep obtenido del laboratorio y b) <i>ground truth</i> | 168 |
| 6.22. Elementos estructurales huecos y columna detectados en el laboratorio. | 169 |
| 6.23. Nubes de puntos del laboratorio y objetos no permanentes identificados. | 171 |
| 6.24. Superposición de los modelos <i>ground truth</i> (en negro) y <i>as-built</i> (en colores). | 172 |
| 6.25. Modelo 3D del Laboratorio de Realidad Virtual. | 174 |

| | |
|--|-----|
| 6.26. Plano del salón. | 175 |
| 6.27. Desviación de los puntos a los planos de ajuste. (Los mapas de color están codificados en centímetros). | 176 |
| 6.28. a) Imagen planar del salón. b) Modelo B-Rep obtenido y c) <i>ground truth</i> | 177 |
| 6.29. Elementos estructurales huecos identificados en el salón. | 179 |
| 6.30. Nubes de puntos y objetos identificados en tres configuraciones de un interior habitado. a) Imagen planar y b) objetos posicionados en la configuración 1. c) Imagen planar y d) objetos posicionados en la configuración 2. e) Imagen planar y f) objetos posicionados en la configuración 3. | 181 |
| 6.31. Superposición de los modelos <i>ground truth</i> (en negro) y <i>as-built</i> (en colores). | 182 |
| 6.32. Modelos <i>ground truth</i> (rojo) y <i>as-built</i> (verde) en una de las mesas identificadas. | 183 |
| 6.33. Modelos 3D del salón. a) Configuración 1. b) Configuración 2. c) Configuración 3. | 186 |
| 6.34. a) Robot móvil equipado con el escáner láser Riegl VZ-400 y el lector RFID. b) Equipos y sensorización interna del robot. | 188 |
| 6.35. Diagrama de comunicación entre los sensores y los equipos internos del robot. | 188 |
| 6.36. Mapa del entorno generado por el robot. | 189 |
| 6.37. Sistema de adquisición de datos durante el proceso de sensado. | 191 |
| 6.38. Plano del entorno bajo estudio. | 192 |
| 6.39. Desviación de los puntos de las paredes más significativas del entorno 3 a los planos de ajuste. a) Pared 10 del aula 011. b) Pared 13 del aula 012. c) Pared 8 del aula 015. (Los mapas de color están codificados en centímetros). | 193 |
| 6.40. Imágenes de paredes significativas del entorno 3. a) Pared 8 del aula 015. b) Pared 10 del aula 011. c) Pared 13 del aula 012. | 194 |
| 6.41. a) Imagen planar del aula 011. b) Modelo B-Rep obtenido y c) <i>ground truth</i> | 195 |
| 6.42. Elementos estructurales huecos detectados en el aula 011. | 197 |

| | |
|--|-----|
| 6.43. a) Imagen planar del aula 012. b) Modelo <i>B-Rep</i> obtenido y c) <i>ground truth</i> | 198 |
| 6.44. Elementos estructurales huecos detectados en el aula 012. | 199 |
| 6.45. a) Imagen planar del aula 013. b) Modelo <i>B-Rep</i> obtenido y c) <i>ground truth</i> | 200 |
| 6.46. Elementos estructurales huecos detectados en el aula 013. | 201 |
| 6.47. a) Imagen planar del aula 015. b) Modelo <i>B-Rep</i> obtenido y c) <i>ground truth</i> | 202 |
| 6.48. Elementos estructurales huecos detectados en el aula 015. | 203 |
| 6.49. a) Imagen planar del aula 016. b) Modelo <i>B-Rep</i> obtenido y c) <i>ground truth</i> | 204 |
| 6.50. Elementos estructurales huecos detectados en el aula 016. | 205 |
| 6.51. a) Imagen planar del pasillo. b) Modelo <i>B-Rep</i> obtenido y c) <i>ground truth</i> | 206 |
| 6.52. Elementos estructurales huecos detectados en el pasillo. | 207 |
| 6.53. Modelo <i>B-Rep</i> obtenido para el entorno número 3. | 208 |
| 6.54. Nubes de puntos y objetos identificados en las aulas escaneadas en la Facultad de Medicina. a) Imagen planar y b) objetos posicionados en el aula 011. c) Imagen planar y d) objetos posicionados en el aula 012. e) Imagen planar y f) objetos posicionados en el aula 013. g) Imagen planar y h) objetos posicionados en el aula 015. i) Imagen planar y j) objetos posicionados en el aula 016. | 211 |
| 6.55. Modelos 3D de las aulas estudiadas en la Facultad de Medicina. a) Aula 011. b) Aula 012. c) Aula 013. d) Aula 015. e) Aula 016. | 216 |

Índice de tablas

| | |
|---|-----|
| 2.1. Diferentes soluciones para localizar recursos. | 26 |
| 2.2. Características de diferentes combinaciones de tecnologías. | 32 |
| 3.1. Rango de actuación del escáner Riegl VZ-400. | 43 |
| 3.2. Especificaciones de la adquisición de datos del escáner Riegl VZ-400. | 43 |
| 3.3. Rango de actuación del escáner del escáner Faro Photon 80. | 48 |
| 3.4. Especificaciones de la adquisición de datos del escáner Faro Photon 80. | 48 |
| 3.5. Bandas de operación para tecnologías RFID. | 50 |
| 3.6. Tipos de etiquetas RFID. | 51 |
| 3.7. Especificaciones del lector FEIG OBID LRU 3500. | 52 |
| 4.1. Error cometido en la clasificación de perfiles. | 92 |
| 5.1. Datos introducidos en las etiquetas. | 111 |
| 6.1. Desviación media de los datos escaneados del laboratorio a las paredes ajustadas. | 166 |
| 6.2. Parámetros calculados para cada par de paredes pertenecientes al laboratorio. | 168 |
| 6.3. Parámetros calculados para los elementos estructurales identifica- dos en el laboratorio. | 169 |
| 6.4. Parámetros calculados para los elementos estructurales identifica- dos en el laboratorio. | 170 |
| 6.5. Resultados de reconocimiento. | 172 |
| 6.6. Resultados de posicionamiento. | 173 |
| 6.7. Número de elementos no permanentes etiquetados. | 175 |

| | |
|--|-----|
| 6.8. Desviación media de los datos escaneados del salón a las paredes ajustadas. | 176 |
| 6.9. Parámetros calculados para cada par de paredes pertenecientes al salón. | 178 |
| 6.10. Parámetros calculados para los elementos estructurales identificados en el salón. | 179 |
| 6.11. Resultados de reconocimiento para cada una de las tres configuraciones. | 183 |
| 6.12. Resultados de posicionamiento. | 184 |
| 6.13. Número de elementos no permanentes etiquetados. | 191 |
| 6.14. Parámetros calculados para cada par de paredes pertenecientes al entorno 3. | 194 |
| 6.15. Desviación media de los datos escaneados del aula 011 a las paredes ajustadas. | 196 |
| 6.16. Parámetros calculados para los elementos estructurales identificados en el aula 011. | 197 |
| 6.17. Desviación media de los datos escaneados del aula 012 a las paredes ajustadas. | 198 |
| 6.18. Parámetros calculados para los elementos estructurales identificados en el aula 012. | 199 |
| 6.19. Desviación media de los datos escaneados del aula 013 a las paredes ajustadas. | 201 |
| 6.20. Parámetros calculados para los elementos estructurales identificados en el aula 013. | 202 |
| 6.21. Desviación media de los datos escaneados del aula 015 a las paredes ajustadas. | 203 |
| 6.22. Parámetros calculados para los elementos estructurales identificados en el aula 015. | 204 |
| 6.23. Desviación media de los datos escaneados del aula 016 a las paredes ajustadas. | 205 |
| 6.24. Parámetros calculados para los elementos estructurales identificados en el aula 016. | 206 |
| 6.25. Desviación media de los datos escaneados del pasillo a las paredes ajustadas. | 207 |

| | |
|---|-----|
| 6.26. Parámetros calculados para los elementos estructurales identificados en el pasillo. | 208 |
| 6.27. Resultados de reconocimiento para cada una de las aulas bajo estudio. | 212 |
| 6.28. Resultados de posicionamiento para objetos no permanentes en el aula. | 213 |

1 |

Introducción

Desde hace más de 3000 años la generación de planos ha permitido representar los objetos de la manera más exacta posible, tanto en forma como en dimensiones. En el ámbito de la construcción, el diseño en papel de los edificios ha facilitado la labor de los actores presentes en el desarrollo de una obra.

La introducción de los computadores en el último siglo ha supuesto importantes mejoras en la representación de entornos constructivos. La precisión y el nivel de detalle en los gráficos ha ido aumentando, de forma considerable, en los últimos años. Además, las representaciones bidimensionales de los escenarios han sido complementadas, o incluso sustituidas, por diseños tridimensionales generados a partir de programas de modelado sólido. Estos modelos 3D pueden ser empleados para multitud de tareas diferentes: desde el desarrollo de juegos hasta la simulación virtual de operaciones quirúrgicas de precisión.

Los modelos tridimensionales de entornos habitados no solo proporcionan una información visual del escenario que representan, sino que también pueden aportar datos relativos a la topología del mismo. Así, se puede conocer la relación existente entre diferentes elementos, posibles modificaciones realizadas en el entorno o controlar el avance de una obra. Este proceso de generación y gestión de datos es el denominado modelado de información para la edificación (BIM, del inglés *Building Information Modeling*).

La generación de modelos 3D que da lugar a un proceso BIM se lleva a cabo, generalmente, de forma manual, lo que supone un trabajo tedioso y complejo. La aparición de las tecnologías de adquisición de información 3D está suponiendo su

aplicación cada vez en mayor medida en este tipo de proyectos. De esta forma, los escáneres láser se emplean para generar de una forma más rápida modelos virtuales de diferentes entornos más o menos complejos a partir de una nube de puntos.

La automatización de este tipo de procesos conlleva un ahorro considerable de trabajo y tiempo, lo que supone una disminución de los costes. Sin embargo, el tratamiento de datos masivos 3D es una tarea compleja y computacionalmente costosa. Por tanto, con el fin de hacer más liviana la labor de procesamiento de datos y generación de modelos, es preciso estudiar la introducción en el proceso de otro tipo de tecnologías.

Las “tecnologías inteligentes” surgen a finales de los 90 y permiten a los usuarios establecer una comunicación rápida y sencilla con el entorno. Más concretamente, y dentro de este ámbito, el avance de la identificación por radio frecuencia (RFID, del inglés *Radio-Frequency Identification*) y la adaptabilidad de sus sistemas a diferentes ambientes han propiciado una constante expansión de esta tecnología. Este tipo de sistemas permite al usuario la obtención de determinada información almacenada en un conjunto de dispositivos denominados etiquetas, las cuales pueden ser adheridas a diferentes objetos.

La adquisición de datos relativos a la geometría de ciertos elementos presentes en un escenario facilita la identificación y el posicionamiento de dichos objetos dentro de una nube de puntos adquirida mediante un sensor de rango. De ahí la propuesta de combinación de tecnologías que se defiende en esta tesis.

1.1. Objetivos de la tesis y metodología de trabajo

Por todo lo expuesto anteriormente, en esta tesis se afronta el problema de la generación de modelos BIM de interiores habitados. Para su resolución, se plantea la combinación de sensores de rango y radiofrecuencia con el fin de agilizar, mediante información almacenada en etiquetas RFID, los algoritmos de

identificación de elementos que conforman un escenario sensado mediante un escáner láser.

Con este trabajo se pretenden identificar y posicionar, de una forma automática, los principales elementos estructurales de una habitación así como los componentes básicos que conforman el mobiliario. A partir de la identificación de dichos componentes, se puede generar un modelo BIM que contenga el posicionamiento de los mismos y la relación existente entre ellos.

Para alcanzar este objetivo general se deben lograr los siguientes objetivos específicos:

1. Lograr un conocimiento sensorial y experiencia en sensores inteligentes, basados en sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID). Estudiar y evaluar diferentes sistemas de lectura-escritura RFID para escenarios de interior y exterior, así como acometer el estudio de los distintos materiales en los que las etiquetas pueden adherirse y la interferencia de los mismos en la comunicación transmisor-transpondedor.
2. Conocimiento sensorial y experiencia en sensores 3D: escáneres láser y sensores basados en imagen. Análisis de distintos sensores láser 3D, destinados a escanear escenarios a diferentes distancias: corto, medio y largo alcance. Evaluar alternativas de sistemas de bajo coste con sensores RGB-D.
3. Identificar las líneas de investigación emergentes en el campo de procesamiento de información 3D para tareas de modelado en grandes espacios: interiores y exteriores.
4. Integración sensorial. Diseñar un sistema multisensorial con tecnologías de sensores 3D y RFID. Definir el sistema, estudiando el ámbito de acción y evaluando el hardware necesario para llevar a cabo las tareas propuestas, considerando la utilización de un escáner láser capaz de registrar datos en interiores en un rango de distancia de decenas de metros y un sistema de lectura/escritura RFID que permita la adquisición de información en los entornos citados.

5. Resolver los problemas de comunicación y almacenamiento de datos en los sistemas RFID y sensores tridimensionales. De cada tipo de elemento a identificar por el sistema, se analizarán los diferentes parámetros que faciliten la labor de reconocimiento del mismo. Se establecerá la comunicación entre los distintos componentes del sistema RFID entre sí y entre el sistema y el computador. Se desarrollará un algoritmo que permita intercambiar y almacenar información vinculada a los componentes del escenario que van a ser identificados.
6. Desarrollar nuevas técnicas de procesamiento de datos 3D para segmentar partes esenciales de la arquitectura en interiores (paredes, suelo y techo).
7. Desarrollar algoritmos de reconocimiento y posicionamiento de objetos usuales en interiores habitados, asistidos con sistemas RFID (sillas, mesas, armarios ...).
8. Generar modelos BIM básicos relativos a la geometría existente en interiores habitados, identificando el objeto y su posicionamiento en escena. Definir modelos B-rep estándar, los cuales proporcionarán información referente a la forma, ubicación y relación entre paredes, suelos y techos.
9. Desarrollar técnicas de identificación y modelado de elementos arquitectónicos en paredes (ventanas y puertas) y en la propia escena (columnas).
10. Generación de modelos 3D de interiores habitados a partir de los modelos B-rep descritos anteriormente y con la adición de modelos procedentes de una base de datos de piezas de mobiliario, las cuales han sido generadas mediante software de modelado 3D.
11. Experimentación del sistema en un robot móvil. Con el objetivo de desplazar de forma automática los sensores en el escenario bajo estudio, se considerará la instalación del sistema integrado (RFID y escáner 3D) en un robot, así como la adaptación de los algoritmos de adquisición y procesamiento de datos con el desplazamiento del robot.

Para la consecución de los objetivos indicados, se ha establecido la siguiente metodología de trabajo:

1. *Documentación bibliográfica.* Estudio de los distintos ámbitos de actuación, identificando los logros alcanzados por diferentes autores en los últimos años. Para ello, se han recopilado artículos y otros documentos especializados en las áreas en las que se ha desarrollado la tesis.
2. *Estudio de la tecnología a emplear y de los entornos de trabajo.* Se han evaluado diferentes tipos de sensores de rango y RFID con el fin de seleccionar aquellos que se adapten a las necesidades de los entornos que desean estudiarse. En lo referente a los entornos de trabajo, se han buscado entornos complejos con oclusiones, que contuvieran mobiliario de tipología diversa y de planta irregular.
3. *Asistencia a eventos* relacionados con la temática: seminarios, workshops, congresos nacionales e internacionales y realización de publicaciones parciales de los distintos trabajos tanto en estos eventos como en revistas especializadas.
4. *Realización de estancias breves.* Una de ellas, corta (de uno/dos meses), en un centro internacional durante el primer año de desarrollo de la tesis. Posteriormente, una estancia de mayor duración (seis meses) durante el segundo año de tesis, también en un centro internacional.
5. *Desarrollo del contenido de tesis.* Reuniones semanales con los directores de tesis y mensuales en el grupo de investigación, donde se ha comprobado la evolución de la tesis. Toma de datos, al menos cada seis meses, en distintos entornos reales utilizando sensores tridimensionales y RFID.

1.2. Marco de realización

Los diferentes trabajos vinculados al desarrollo de esta tesis doctoral han sido llevados a cabo en el Departamento de Ingeniería del Software y Sistemas Informáticos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática de la UNED. Asimismo, se han realizado diversos trabajos en el *3D Visual Computing and Robotics Lab*, del Área de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad

de Castilla-La Mancha, ubicado en la Escuela Superior de Informática de Ciudad Real.

La labor investigadora del doctorando se ha complementado con la realización de dos estancias breves en centros de investigación de referencia a nivel mundial en el ámbito de la visión por computador. Una de ellas se llevó a cabo en *The Robotics Institute*, de *Carnegie Mellon University*, en Pittsburgh (Estados Unidos), bajo la supervisión del Dr. Daniel Huber. La segunda estancia se desarrolló en el Departamento de Ingeniería Eléctrica (ESAT) de la *Katholieke Universiteit Leuven*, en Lovaina (Bélgica) y fue dirigida por el Dr. Luc van Gool.

Estos trabajos han sido realizados con la financiación de una beca para la Formación del Personal Investigador (FPI), con referencia BES-2009-019034 y al amparo de los Proyectos de los Ministerios de Educación y de Investigación, Ciencia en Innovación con referencias DPI-2008-05444 y DPI 2009-14024-C02-01, así como el proyecto de la Comunidad Autónoma de Madrid con referencia S2009/DPI-1559, encuadrado en el programa RoboCity2030-II.

1.3. Estructura de la tesis

El presente documento se ha estructurado en siete capítulos, siendo el primero de ellos esta Introducción, más un anexo y un apartado final en el que se muestran los trabajos referenciados en este escrito.

En el Capítulo 2 se hace referencia a los trabajos realizados en los ámbitos de actuación de la tesis. Por un lado, se presentan las contribuciones de otros autores en el campo del tratamiento de datos 3D, principalmente en el entorno de la construcción. Por otro lado, se hace un estudio de los trabajos existentes en lo referente al intercambio de información mediante tecnologías de identificación por radio frecuencia (RFID). En este caso, también se hará especial hincapié en el ámbito de la construcción.

A continuación, el Capítulo 3 muestra las diferentes tecnologías empleadas para la obtención de información de los entornos estudiados. Acompañando la

descripción de cada uno de los sensores, se puede encontrar una pequeña introducción teórica al funcionamiento de los mismos.

El Capítulo 4 presenta la técnica desarrollada para la generación de estructuras básicas pertenecientes a espacios interiores. En este apartado se muestran los procedimientos llevados a cabo para la identificación de los principales elementos constructivos de una habitación: paredes, suelo y techo, columnas y huecos pertenecientes a puertas y ventanas.

Tras definir los elementos estructurales, en el Capítulo 5 se procede a estudiar los “elementos no permanentes” en interiores. Con “elementos no permanentes” se hace referencia a aquellos objetos que, formando parte de la habitación, son fácilmente retirados del entorno o su posición es modificada. Estos elementos se corresponden con piezas de mobiliario como son: sillas, mesas y armarios. En este capítulo se muestra cómo se combinan las tecnologías RFID y escáneres láser.

En el Capítulo 6 se presentan los resultados obtenidos tras la aplicación de los algoritmos desarrollados en diferentes escenarios. En primer lugar, se muestran los entornos de actuación así como las tecnologías empleadas. Posteriormente, se presentan determinadas tareas de preprocesamiento de la información. También se incluye en este capítulo la experimentación realizada sobre un robot móvil, en el cual se instalaron los sensores.

Finalmente, en el Capítulo 7 se reflejan las conclusiones así como posibles líneas de investigación que pueden abordarse a partir de este trabajo.

2 |

Estado del arte

En el presente capítulo se presenta un estudio del estado del arte de los ámbitos de actuación de esta tesis. Como se puede apreciar, se valoran trabajos realizados en los campos de: tratamiento de datos 3D, procesamiento de información de datos adquiridos mediante sensores RFID y combinación de la identificación por radio-frecuencia con diferentes tecnologías en el ámbito de la construcción.

2.1. Procesamiento de datos masivos 3D

2.1.1. Introducción. Campos de aplicación

La posibilidad de mostrar, manipular, almacenar y compartir información 3D referente a objetos existentes es uno de los principales retos a los que se enfrenta la visión por computador. Multitud de aplicaciones han sido desarrolladas en las últimas décadas con el fin de mejorar estos trabajos en los campos de la arquitectura, el diseño, el patrimonio o la robótica entre otras disciplinas. De forma paralela al avance del software, los dispositivos de adquisición de datos, como los escáneres láser, han ido mejorando en precisión y adaptabilidad, ya sea en trabajos a cortas distancias, escaneando objetos, o en el sensado de edificios mediante sensores de rango.

En cuanto al reconocimiento de objetos a partir de nubes de puntos, es de gran importancia en diferentes aplicaciones. La ingeniería inversa, el diseño in-

dustrial y la visualización 3D son ámbitos en los cuales se requiere de información proporcionada por escáneres láser. Así, en (67) se muestra un algoritmo de reconocimiento de objetos de forma libre en imágenes de rango, a partir del estudio de histogramas multidimensionales generados mediante una serie de puntos característicos de los diferentes objetos. La propuesta presentada en (93) permite obtener modelos parciales o completos de objetos a través de un sistema de representación de formas basado en siluetas (DGI-BS). Otra solución orientada a la detección de objetos 3D en nubes de puntos es la proporcionada por (80), la cual tiene como base la transformada de Hough generalizada.

También existen propuestas en las cuales, además de estudiar escenas interiores, se trabaja con escenarios exteriores. En (66) los autores proponen un algoritmo de división de imágenes de rango y mapas de reflectancia asociados en segmentos, los cuales se ajustan a diferentes objetos con propiedades de reflectancia homogéneas con el fin de reconstruir escenas 3D.

En el campo de la construcción, como se muestra en el apartado siguiente, el reconocimiento automático de objetos en escenarios es cada vez más empleado. Así, en (114) los autores presentan un procedimiento para detectar elementos constructivos (paneles de poliestireno expandido) en un entorno bajo construcción a partir de datos 3D obtenidos mediante un escáner láser. Por otro lado, con el fin de automatizar el proceso de monitorización de un edificio en construcción, en (40) se muestra un framework para el reconocimiento de objetos 3D a partir de un sistema de cámaras estéreo.

La generación de mapas 3D y la reconstrucción de escenas urbanas también son un ámbito de actuación donde los datos 3D adquiridos mediante escáneres juegan un papel importante. La gran cantidad de información y la complejidad de las nubes de puntos bajo estudio dan una mayor importancia a la automatización de estos procesos. Aprovechando la presencia de elementos repetitivos en este tipo de escenarios (como pueden ser las ventanas en un rascacielos), en (57) se propone un algoritmo para la detección de elementos arquitectónicos en escenarios urbanos, estudiando la periodicidad del entorno mediante la transformada de Fourier. En (49), los autores proponen un algoritmo de segmentación de nubes de puntos obtenidas mediante escáneres montados en plataformas aéreas, para un

posterior modelado 3D de edificios. Por su parte, Li et al. (87) han desarrollado un algoritmo de modelado de edificios, considerando que estos pueden ser generados a partir de operaciones de extrusión y escalado sobre las secciones que definen la construcción.

Además de las aplicaciones de las tecnologías de adquisición de datos 3D en el campo de la arquitectura civil, como las que se muestran anteriormente, existen multitud de trabajos orientados al estudio de edificios que forman parte del patrimonio. Gracias a estos trabajos, determinadas construcciones son digitalizadas con el fin de generar modelos 3D que permitan reconstruir las edificaciones, realizar visitas virtuales o generar planos que antes no existían, entre otras aplicaciones. Como ejemplo de este tipo estudios se muestran los siguientes trabajos. Remondino et al. (104) llevaron a cabo un proyecto en el cual reconstruyeron virtualmente un conjunto de castillos medievales. Para ello, combinaron diferentes técnicas de adquisición de datos, como fotografías tomadas desde helicópteros o desde tierra y escáneres láser, con planos de los propios edificios. En (38) (45), los autores presentan la generación de componentes constructivos de edificios antiguos a partir de escáneres láser, fotografías y reglas de diferentes estilos arquitectónicos. Con el objetivo de detectar áreas ocluidas o definir la próxima posición del sensor, en (109) se muestra una técnica de segmentación para descomponer de forma automática una imagen planar panorámica en un conjunto de proyecciones planares.

Como se mencionaba anteriormente, uno de los ámbitos que han aprovechado los avances en visión por computador en los últimos años es el de la robótica. Para un robot, sobre todo si es móvil y se desplaza de forma autónoma en el entorno de trabajo, es imprescindible conocer su posición y su orientación en el espacio. Esta tarea puede llevarse a cabo mediante la incorporación al robot de un escáner láser que le permita ubicarse en el escenario.

Así, muchos investigadores recurren a esta tecnología para facilitar la navegación de los robots móviles, mediante algoritmos de mapeo y localización simultánea (o SLAM, de sus siglas en inglés). Por ejemplo, en (65) se presenta una propuesta de algoritmo SLAM para espacios interiores, mientras que (25) muestra

una combinación de percepción 3D con localización y mapeo 2D empleada para navegación de robots en exteriores.

En otros casos, buscando la automatización del proceso, se ejecuta un primer paso en el que se desarrolla un proceso de localización del robot y se realiza un mapa 2D del entorno, para posteriormente adquirir el resto de información 3D acerca del edificio buscando la siguiente mejor vista (o *next best view*) (16) (118). Otra aplicación de la visión en robots móviles es la propuesta en (108). En este trabajo, los autores desarrollan un algoritmo a partir de información 3D proporcionada por un escáner, que permite al robot identificar puertas y sus tiradores durante su trayecto.

2.1.2. Procesamiento de entornos de la construcción

Durante las últimas décadas, las tecnologías de adquisición de información 3D están siendo aplicadas cada vez en mayor medida en proyectos de ingeniería, construcción y arquitectura (AEC/FM, del inglés *Architecture, Engineering, Construction and Facility Management*). Otros sistemas empleados en labores de medida, como estaciones totales, cintas métricas y prototipos basados en cámaras estéreo, son demasiado lentos e imprecisos comparados con los escáneres láser, particularmente en entornos de grandes dimensiones. Asimismo, la alta densidad de puntos proporcionada por un solo escaneo (que puede alcanzar varios millones de puntos) y el considerable aumento tanto en precisión como en adaptabilidad de los escáneres láser, hacen esta tecnología muy adecuada para su uso en el modelado 3D de edificios.

En las áreas de arquitectura e ingeniería civil, la visión por computador se está abriendo hueco con el fin de permitir paseos virtuales por edificios situados en lugares lejanos, realizar análisis de estructuras sin poner en peligro las mismas o incluso preservar construcciones históricas que pueden ir deteriorándose con el paso del tiempo. Estos estudios pueden llevarse a cabo en el exterior de los edificios, donde se realiza un tratamiento de la información ligada a la fachada de la construcción, o bien pueden ser relativos al interior de los mismos, donde se trabaja con las diferentes estancias así como con los pasillos que unen las mismas.

La información 3D adquirida facilita el modelado de información para la edificación con precisión suficiente. Estos modelos BIM, introducidos anteriormente, han sido y todavía son obtenidos de forma manual, lo que supone un tedioso, intensivo y complejo trabajo. Por lo tanto, la línea de futuro se centra en poder acometer de forma automática y con la precisión requerida modelos básicos a partir de datos de escáner.

En muchas ocasiones, los datos en bruto procedentes de los escáneres son manipulados por un diseñador o procesados por un ingeniero con el objetivo de crear un modelo simplificado del escenario. Este conocido proceso de ingeniería inversa se aplica en la creación de modelos 3D. Así, un modelo simplificado proporciona una representación a alto nivel de la escena sensada. Este modelo abarca desde un modelo CAD, en el cual una pared es representada como un conjunto de superficies planas e independientes, a un modelo BIM, donde una pared se concibe como un objeto volumétrico compuesto por múltiples superficies con propiedades relevantes como color, material, coste, etc. En trabajos anteriores, se ha hecho más énfasis en la creación de modelos visuales y realistas que en la generación de modelos paramétricos. Algunos ejemplos en esta categoría son los propuestos por El-Hakim et al. (51), el cual se centra en espacios interiores o los trabajos de Früh et al. (58) y Remondino et al. (104), basados en entornos exteriores. En estos casos, una gran parte del proceso de modelado es supervisado por un usuario, con lo cual no se puede decir que los modelos sean generados de una manera automática.

En determinadas ocasiones, la información procedente de un escáner láser no es suficiente para definir el entorno. Por tanto, con el fin de obtener información vinculada a la estructura de un edificio, varios autores fusionan información procedente de diferentes sensores, como escáneres y cámaras. Así, se recurre a la fotogrametría para obtener información métrica acerca de fachadas de edificios (140) o bien se combina la visión 3D con la fotografía para conseguir mayor realismo en visitas virtuales en el interior de construcciones históricas (13).

2.1.2.1. Modelado de información para la construcción

Después de recoger los datos referentes a la geometría de la construcción, el proceso que debe realizarse es el de segmentar los distintos elementos que conforman la estructura. Agrupando los puntos que tienen las mismas propiedades, se divide el conjunto de datos, enfrentándonos a un problema de segmentación.

En la evaluación de fachadas de edificios se pueden encontrar los mismos elementos fundamentales que se encontrarían en las paredes de los interiores: puertas y ventanas. Autores como (102) proponen un algoritmo de crecimiento de superficies planas con el objetivo de diferenciar ventanas, puertas y tejado del muro que da forma a la fachada. Stamos (117) presenta un trabajo en el que se modelan grandes áreas planas presentes en una habitación mediante primitivas y áreas no planas mediante mallas. Vosselman et al. (127) evalúan diferentes técnicas con el fin de extraer diversas formas parametrizadas (planos, cilindros y esferas) mediante métodos no iterativos. Otra vía diferente (24) para segmentar componentes planos consiste en el empleo del algoritmo RANSAC (56) desarrollado para reducir el tiempo de computación en métodos de votación, como la Transformada de Hough.

En (17) (18) (58) (102) se ilustra la obtención de modelos detallados de parte de las paredes y fachadas de edificios. En (17) (18) , el procesamiento de datos va desde la detección de ventanas en regiones de baja densidad de puntos hasta determinar otros patrones de datos en las fachadas. En (102) se identifican elementos característicos de las fachadas, como muros y tejados. Después, determinada información acerca de esos elementos (tamaño, posición, orientación y topología) se emplea para reconocer los objetos en una nube de puntos. Früh et al. (58) presentan un conjunto de algoritmos de procesamiento de datos para generar mallas de fachadas con textura, a partir de información procedente de superficies verticales 2D sensadas mediante un escáner láser. Por otro lado, Thrun et al. desarrollaron un método de extracción de planos basado en el algoritmo esperanza-maximización (EM) (122). Otros investigadores han propuesto algoritmos basados en *plane sweep* para encontrar regiones planas (65) (26).

El reconocimiento de estructuras y molduras en paredes es uno de los pasos imprescindibles hacia la automatización del modelado de información para la

edificación. Mediante este proceso, se generan y se gestionan datos de un edificio durante su ciclo de vida, abarcando la geometría del edificio, las relaciones espaciales, la información geográfica y las cantidades y propiedades de los componentes de cada edificio. Autores como (8) han desarrollado algoritmos para la detección de ventanas mediante análisis de contornos en imágenes binarias y de la información de textura obtenida por el escáner. En otros trabajos (3), después de identificar de forma automática partes esenciales de edificios, como paredes, suelos y techos bajo condiciones de oclusión severa, se reconstruyen los muros identificando elementos constructivos como puertas y ventanas.

2.1.2.2. Métodos para la creación de modelos BIM

En el Capítulo 4 se presenta un método que genera automáticamente un modelo de representación de frontera (B-Rep, del inglés *Boundary Representation*) para espacios interiores tras procesar nubes de puntos densas adquiridas mediante escáneres láser desde unas localizaciones determinadas. El modelo 3D representa el estado actual del edificio, denominado “*as-is condition*”. Este modelo no tiene que coincidir, necesariamente, con el edificio diseñado (“*as-designer condition*”) o con el construido (“*as-built condition*”). De hecho, la construcción puede haber sido ligeramente modificada o restaurada de su concepción inicial. En otras ocasiones, no se tiene acceso a los planos de diseño o directamente, no existen. Así, la generación automática de modelos “*as-is*” de escenarios habitados es un interesante campo de investigación que se está abordando desde diferentes ámbitos, incluyendo arquitectura, ingeniería, robótica, etc. (119).

Aunque no existen muchas publicaciones que traten la creación automática de modelos 3D, en los últimos años se han publicado interesantes trabajos relacionados con este proceso. Una revisión de reconstrucciones automáticas de modelos “*as-built*” puede encontrarse en (119). El proceso de creación de un modelo semántico puede variar en función de los parámetros de entrada y la salida esperada. Generalmente, el proceso de modelado automático puede dividirse en tres pasos: adquisición de datos, procesado de la información y modelado. La mayoría de los artículos publicados se centran en el segundo de ellos: el procesado de la información.

En este ámbito, el procesamiento de datos 3D significa el tratamiento de millones de puntos desestructurados con el objetivo de obtener estructuras de datos de alto nivel. Diferentes propuestas, las cuales convierten datos 3D en representaciones de alto nivel en el contexto de edificios, han sido desarrolladas en los últimos años. Aquí se puede distinguir entre trabajos enfocados a detectar y modelar objetos singulares o partes concretas de grandes escenarios y aquellos que generan modelos completos de escenas interiores y exteriores.

Con respecto al primer tipo de propuestas, uno de los primeros trabajos orientados a la obtención de modelos 3D a partir de escáneres láser en un contexto local es el presentado por Kwon et al. (86). En este trabajo, los autores presentan un conjunto de algoritmos con el fin de ajustar nubes de puntos dispersos a un conjunto de primitivas volumétricas (cuboides, cilindros y esferas), las cuales pueden ser extendidas a grupos de primitivas pertenecientes a un mismo objeto. Un proceso automático para la segmentación y el reconocimiento de objetos CAD 3D en el contexto de la construcción es presentado en (20). En (19) se muestra un método semiautomático para identificar y ajustar modelos 3D a datos sensados de estructuras de acero de edificios industriales. El autor desarrolla una variante del algoritmo ICP para el registro de los datos con el objetivo de reconocer modelos CAD en nubes de puntos de grandes entornos. El método es semiautomático porque un registro aproximado debe llevarse a cabo de manera automática. El mismo autor presenta en (21) un sistema para realizar un registro poco preciso de datos procedentes de escáneres láser con modelos 3D en el contexto de la industria AEC/FM. La propuesta se basa en la búsqueda de planos en la nube de puntos, para hacerlos coincidir con planos extraídos de los modelos 3D. Sin embargo, el proceso de *matching* es realizado a mano. Otros autores (53) proponen la combinación de nubes de puntos adquiridas mediante escáneres láser y fotogrametría con el fin de generar modelos 3D de un edificio bajo construcción. El trabajo de Rusu et al. (107) reconoce y localiza objetos relevantes de una cocina incluyendo armarios, material de cocina y mesas. Los autores identifican en las nubes de puntos planos y formas geométricas 3D. Una de las innovaciones consiste en incluir una nueva representación multi-dimensional para nubes de puntos y técnicas robustas, eficientes y precisas para la computación de estas representaciones, las cuales facilitan la creación de una jerarquía de modelos de objetos.

En relación con la creación automática de modelos completos de interiores, se pueden ajustar diferentes superficies geométricas o primitivas volumétricas a una nube de puntos 3D con el objetivo de modelar paredes, puertas, techos, columnas, vigas y otros elementos de interés. En su formato más simple, las primitivas modeladas son identificadas mediante etiquetas (e.g. “pared”). A más alto nivel, se establecen relaciones espaciales y funcionales entre estructuras próximas. Desarrollos interesantes pueden encontrarse en (4) y (6) con respecto a esta idea. En estos trabajos, los autores identifican y modelan los principales componentes estructurales de un entorno interior (paredes, suelos, techos, ventanas y puertas) a pesar de trabajar en entornos desordenados con oclusiones, lo que ocurre frecuentemente en interiores habitados. Sin embargo, en este trabajo solo se abordan habitaciones de planta rectangular. Okorn et al. (100) presentan un método automático para la creación de planos 2D precisos del interior de edificios. Los autores proyectan los puntos en un plano 2D y crean un histograma de densidad de puntos. A partir de esta información, se extraen los segmentos correspondientes a las paredes mediante una Transformada de Hough. Los primeros pasos del método presentado en el Capítulo 4 parecen estar inspirados en la misma estrategia, ya que se lleva a cabo una proyección de la nube de puntos para aproximar la ubicación de las paredes. Sin embargo, este proceso solo se emplea para delimitar los puntos que pertenecen a las paredes.

2.1.2.3. Huecos/Oclusiones

Además de elementos constructivos, las habitaciones también contienen mobiliario que puede crear oclusiones. Estos elementos influyen en la detección y reconstrucción de paredes. Así, Adán y Huber (4) presentan una solución basada en una estrategia de etiquetado en diferentes espacios habitados, en los cuales las paredes son reconstruidas. Castellani et al. (31) trabajan en la reconstrucción de esquinas y bordes de muebles parcialmente ocluidos. Otros autores (128) aprovechan la simetría de determinados objetos escaneados en una habitación para reconstruirlos cuando son afectados por oclusión. Y Dell’Acqua y Fisher (46) muestran una técnica para reconstruir superficies planas ubicadas detrás de objetos que las ocluyen.

2.2. Procesamiento de datos RFID

2.2.1. Introducción

El concepto de entorno inteligente fue propuesto por la compañía Philips y aparece por primera vez en la literatura en 1999 (1) (2). Un entorno inteligente es definido como un lugar donde diferentes dispositivos tecnológicos (sensores, lectores, computadores . . .) son invisibles a los usuarios y es fácil interactuar con ellos (88). Por ejemplo, un modelo sencillo de entorno inteligente es una habitación donde las luces se encienden automáticamente si el valor de la luminosidad es inferior a un límite y si hay gente en su interior que necesite este recurso. Esta definición conduce a varias líneas de investigación que buscan automatizar las interacciones humano-humano o humano-máquina. Esta filosofía supone un cambio significativo cuando se trata de interactuar con dispositivos tecnológicos. Los teclados tradicionales o los ratones están siendo reemplazados, cada vez más, por otro tipo de dispositivos que necesitan menor interacción por parte del usuario (controles remotos, sensores inalámbricos, pantallas capacitivas . . .).

Uno de los sistemas inalámbricos más extendidos y prometedores es la tecnología de identificación por radio frecuencia (RFID) (29) (110), la cual está basada en el intercambio de información por medio de señales electromagnéticas (48).

Los campos de aplicación de las tecnologías RFID han ido aumentando durante las últimas décadas. Debido a la facilidad de esta tecnología para identificar y localizar objetos, la RFID ha sido empleada para muy diversas aplicaciones, como: identificación de animales, aviación, construcción y gestión de edificios, salud, logística o seguridad (98) (138) (139). Un breve resumen de aplicaciones RFID se muestra en los siguientes párrafos.

En la industria de la alimentación es importante conocer el historial y la localización de los productos (trazabilidad) con el objetivo de garantizar la calidad y la seguridad en la cadena alimenticia. En (90), los autores estudian el control de un conjunto de parámetros en la producción de jamón, desde el proceso de matanza del cerdo hasta su distribución. Mennecke y Townsend (92) proponen un

sistema RFID para determinar la procedencia de un producto en la industria de producción de carne. Además, en la gestión de bienes de consumo empaquetados, importantes compañías como Wal-Mart (105) o Sam's Club (131) requieren a sus proveedores la instalación de etiquetas RFID en palets o cajas con el objetivo de mejorar los procesos de almacenamiento, inventario y seguridad.

En el ámbito de los cuidados sanitarios, existen trabajos en los que las tecnologías RFID son empleadas para gestionar diferentes aspectos en centros médicos. Algunas tareas, como transfusiones de sangre, son controladas mediante tecnologías RFID (43) con el objetivo de localizar la bolsa de sangre correspondiente a un determinado paciente. Amini et al. (9) proponen el uso de un sistema RFID para recoger información de los movimientos de los pacientes del área de traumatología.

Controlar la posición de componentes en una cadena de fabricación es un proceso que comúnmente se lleva a cabo por medio de tecnologías RFID. En la construcción de robots (132), la integración de un dispositivo RFID permite obtener información acerca de las operaciones que se han de realizar a continuación sobre un componente. Infineon Technologies, uno de los fabricantes de semiconductores más importantes del mundo, ha creado un sistema de identificación y localización de componentes mediante sensores RFID y de ultrasonidos con el objetivo de mejorar la logística en el proceso de fabricación de obleas (120).

Desde la década de los 90, varios autores han propuesto aplicaciones potenciales basadas en tecnología RFID en el campo de la construcción, con el objetivo de controlar determinados procesos como la gestión del hormigón y la localización de trabajadores y equipamiento (73). Diferentes trabajos, en los cuales la RFID es empleada para localizar tuberías u otros componentes prefabricados, son comparados en (55). En 2006, el consorcio Erabuild presentó una revisión del estado de la tecnología RFID en la industria de la construcción (54). En este trabajo, los autores presentan distintos proyectos que se han llevado a cabo empleando aplicaciones RFID y proponen ciertas recomendaciones para futuros trabajos en este ámbito.

A lo largo de las siguientes secciones, se presentan diferentes aplicaciones de la tecnología RFID en el campo de la construcción. Aunque las primeras propuestas

se basaron en el tracking de materiales, trabajadores y determinados dispositivos en el área de trabajo, en los últimos años, los trabajos en los cuales se emplean sistemas RFID abarcan el ciclo de vida completo de un edificio. Actualmente, la combinación de sensores RFID con otro tipo de tecnologías es puesta en práctica desde la concepción de un edificio hasta la localización de usuarios y el mapeo del entorno una vez que las obras han concluido y el edificio está habitado.

La Figura 2.1 muestra las diferentes fases del ciclo de vida de un edificio, en las cuales la identificación por radio frecuencia facilita ciertos procesos. Como puede apreciarse, la seguridad es un factor a tener en cuenta durante las diferentes fases.



Figura 2.1: Diagrama de flujo del ciclo de vida de un edificio.

2.2.2. La tecnología RFID en las fases previas al proceso constructivo

Como se ha mencionado anteriormente, la tecnología de identificación por radio frecuencia demuestra un gran potencial en la monitorización de los procesos constructivos. Una gran variedad de operaciones se llevan a cabo desde que la construcción de un edificio comienza. Por un lado, existen diferentes procesos relacionados con la concepción de sistemas RFID que facilitan el proceso constructivo. Por otro, se puede considerar el uso de RFID en la producción de diferentes materiales que serán empleados en la construcción del edificio. Este apartado muestra diferentes aplicaciones en estas fases previas.

2.2.2.1. Planificando la implementación de sistemas RFID en la industria de la construcción

Los ambientes en los que se desarrollan las obras, así como las condiciones de trabajo, son muy diferentes para cada proceso constructivo. Por tanto, los materiales empleados variarán en función del tipo de construcción, las condiciones climatológicas serán distintas dependiendo del lugar de realización de las obras y también influirá si se está trabajando en interiores, exteriores o si se trata de una construcción subterránea.

La capacidad de almacenamiento de las etiquetas y su ubicación en la escena, el tipo de lector empleado (portátil o fijo) y su frecuencia de operación, dependen de determinados parámetros como: la necesidad o frecuencia de modificación del contenido de las etiquetas y la seguridad de la información que contienen, el rango de acción del sistema, los materiales o el equipamiento presentes en el entorno y la necesidad de mover el lector (72). Otro parámetro que debe ser tenido en cuenta es la ubicación del sistema RFID. El material con el cual están fabricados los componentes a los que las etiquetas son adheridas puede interferir severamente en el intercambio de información. De aquí la importancia de evaluar la combinación de etiquetas y materiales (123). Si la etiqueta está montada sobre un elemento metálico, la etiqueta debe colocarse al menos a 1 centímetro de la superficie. Si varias etiquetas están próximas entre sí, se deben considerar las colisiones entre ellas. Además, si existen fuentes electromagnéticas trabajando en el entorno en una frecuencia similar a la del sistema RFID, deben tenerse en cuenta consideraciones especiales (72). Por otro lado, la necesidad de mediciones precisas en una infraestructura subterránea lleva a instalar un sistema enterrado, como el propuesto por Dziadak et al. (50).

En otras ocasiones, también debe considerarse la combinación de la información RFID con otro tipo de información, con el fin de gestionar entornos constructivos en tiempo real. Un ejemplo de esta aplicación puede ser la creación de una base de datos en la cual, información almacenada en etiquetas y datos procedentes de un programa de diseño asistido por computador se combinan para crear un sistema de monitorización en tiempo real (76).

2.2.2.2. Fabricación de componentes constructivos y cadena de suministro

Una vez que la construcción del edificio está planificada, diferentes materiales son transportados desde la fábrica o el almacén al lugar donde se levantará el edificio. En este proceso se ven envueltas diferentes partes: un fabricante, un distribuidor y finalmente, un constructor. En los últimos años, la tecnología RFID está ganando importancia en el abastecimiento de componentes, por lo que la toma de decisiones sobre el uso de sistemas RFID en cadenas de suministro es una cuestión importante (ver (126)).

En la década de los 90, aparece la idea de incorporar la tecnología RFID a la entrega de hormigón en obras por medio de sistemas que aseguren una correcta entrega y facturación y permitan establecer un control de calidad. Los procesos de mezclado del hormigón y tiempo de carga y descarga son monitorizados y notificados tanto a los que realizan como a los que reciben el envío. Esta propuesta (73) ha sido tomada en consideración durante estos últimos años en diferentes estudios acerca del transporte del hormigón. Moon et al. (95) presentan un nuevo sistema de monitorización para el batido del hormigón, empleando la información generada durante este proceso en el control de la calidad del producto.

Con el fin de ahorrar tiempo en el proceso de construcción, los componentes prefabricados son cada vez más empleados en el levantamiento de edificios. La fabricación de este tipo de componentes puede ser inspeccionada y gestionada por medio de RFID. Un sistema de gestión de la producción de componentes prefabricados puede ser desarrollado con el objetivo de inspeccionar materias primas y controlar los procesos de producción y logística (135). Wang (129) demuestra que la tecnología RFID de tipo pasivo tiene potencial para mejorar la monitorización y la gestión de la inspección de la calidad de elementos de hormigón.

Otros componentes que son prefabricados antes del proceso de construcción son las tuberías. En cada proceso industrial, los constructores instalan una importante cantidad de tuberías pre-ensambladas. Estos componentes están asociados a unos procesos de diseño, fabricación, almacenamiento, transporte, instalación e inspección, los cuales son costosos y críticos y cuyo proceso de monitorización

puede dar lugar a muchos problemas. Una aplicación RFID (115) puede solucionar posibles problemas por medio de la automatización del seguimiento de esta cadena de procesos.

Las tareas mencionadas anteriormente implican el transporte de los materiales desde la fábrica hasta el lugar de construcción. Por tanto, otro factor a tener en cuenta para mejorar la eficiencia de estos viajes y reducir las emisiones de dióxido de carbono es el kilometraje de los vehículos. Este objetivo puede ser alcanzado por medio de un sistema RFID que permita mejorar la tasa de carga de los vehículos, ayudando a reducir las emisiones de CO_2 (77).

2.2.3. Control del proceso constructivo usando tecnologías RFID

Durante el proceso de construcción de un inmueble, una gran cantidad de materiales y un número considerable de trabajadores equipados con herramientas y maquinaria están cambiando su posición continuamente en el entorno de trabajo. La localización de recursos y materiales ayuda a mejorar la productividad en la construcción de un edificio, así como la seguridad de los trabajadores. La gestión de recursos en los entornos bajo construcción, comprendiendo la organización de los materiales almacenados y el control de entregas de componentes, no es un desafío nuevo. De acuerdo con Thomas et al. (121), el cociente beneficio/coste de una gestión efectiva de los materiales puede aumentar hasta 5.7, mostrando las claras ventajas de poner atención a este proceso. La idea de la integración de computadores en los procesos de construcción (CIC, del inglés *Computer-Integrated Construction*) aparece a finales de la década de los 80 y principios de los 90 (15) buscando un control automático del proceso de construcción y dejando a un lado las inspecciones manuales.

2.2.3.1. Sistemas de tracking

Materiales

La tecnología RFID ofrece la oportunidad de localizar materiales tan rápido como

su velocidad de actualización y con una precisión del orden de metros (73). El cálculo de la ubicación o incluso la pose (124) (133) de sensores inalámbricos en un lugar bajo construcción puede ayudar a identificar materiales presentes en el escenario y estimar su posición. Varias técnicas han sido desarrolladas recientemente con este propósito (30). Una de estas propuestas consiste en integrar un sistema de posicionamiento global (GPS, del inglés *Global Positioning System*) con un sistema de información geográfica (GIS, del inglés *Geographic Information System*) y de forma manual, buscar objetos etiquetados con el fin de registrar sus coordenadas (28). Otras técnicas destinadas a estimar la posición de diversos materiales durante el proceso de construcción de un edificio están basadas en determinar la proximidad de un objeto a ciertos puntos de referencia (27)(47)(68) (116). Con el objetivo de salvar las limitaciones de los sistemas basados en GPS y RFID, el cálculo del posicionamiento de un objeto puede mejorar combinando tecnologías de identificación por radio frecuencia con otras basadas en ultrasonidos (113).

Como se menciona en el apartado 2.2.2.2, los componentes prefabricados se vienen empleando en la construcción en las últimas décadas. Estos elementos estructurales son numerosos y normalmente se encuentran dispersos en el espacio de trabajo, haciendo realmente compleja una monitorización en tiempo real. Componentes estructurales fabricados en acero (60), como vigas, y paneles de hormigón (81) se equipan con etiquetas con el objetivo de controlar su posición en la zona de construcción. El uso de etiquetas especiales para metales mejora notablemente la robustez del proceso.

Una gran cantidad de componentes entra a los lugares en construcción, pero también existe una importante cantidad de residuos que necesita ser retirada de la zona. En muchos países, estos residuos deben ser depositados en lugares especiales para ser reciclados o reutilizados. Una pareja de lectores RFID equipados con cámaras pueden instalarse en el área constructiva y en el lugar de deposición de residuos y etiquetas RFID son adheridas a los parabrisas de los camiones con el fin de controlar correctamente el movimiento de los materiales desechados (71).

En el ejemplo anterior, la información procedente del sistema RFID y de las imágenes es procesada de forma separada. Sin embargo, la fotografía de un objeto del cual se controla la posición puede ser combinada con información RFID,

creando un fichero gráfico con datos RFID embebidos (59). De esta manera, se puede probar la autenticidad de las fotos.

Recursos

Si el control de la posición de los materiales es un factor a tener en cuenta en un lugar en construcción, más importante aún es la localización de los recursos humanos. En muchas ocasiones, un supervisor se encarga de evaluar los trabajos realizados y los movimientos de los trabajadores. Sin embargo, en el lugar de trabajo puede haber muchos empleados moviéndose simultáneamente. Con el objetivo de controlar las operaciones realizadas por los trabajadores, estos pueden ser equipados con etiquetas RFID (34). De esta manera, tanto los movimientos de los operarios como el tiempo de trabajo son registrados. La Figura 2.2 muestra cómo se ubican los lectores y las etiquetas en el espacio de trabajo. Los lectores se fijan a los andamios y las etiquetas son adheridas a la ropa de los trabajadores.

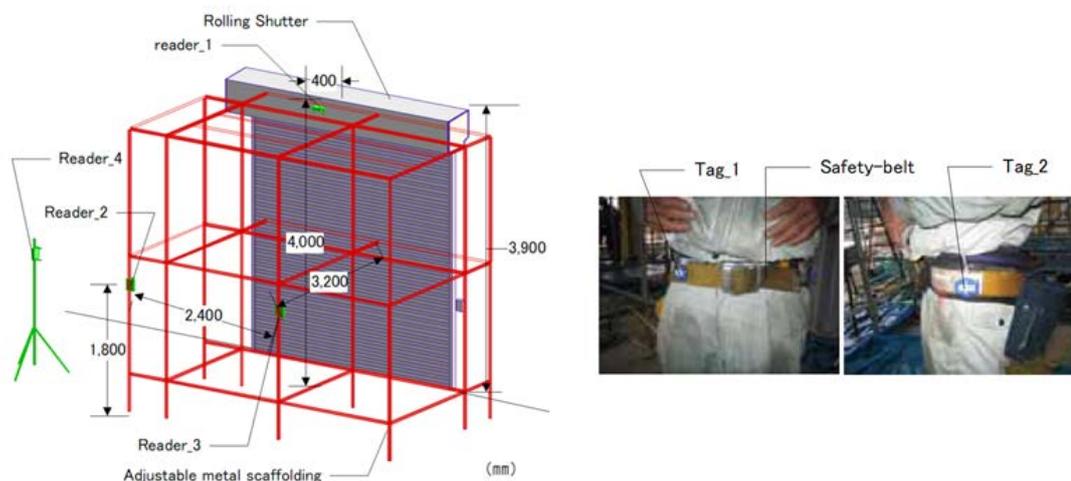


Figura 2.2: Localización de lectores (izquierda) y etiquetas (derecha)(34).

En la mayoría de los edificios en construcción, el número de herramientas excede del necesario con el fin de evitar retrasos. Sin embargo, la instalación de etiquetas RFID en el equipamiento (63) puede ser una estrategia útil para optimizar la cantidad de recursos necesaria.

La Tabla 2.1 muestra las propuestas mencionadas en este apartado, indicando si los autores combinan diferentes tecnologías para alcanzar su propósito.

| | Per- sonal | Equipa- miento | Mate- rial | Tipo de material o componente | Tecnología complementaria |
|-------|---------------|-------------------|---------------|----------------------------------|------------------------------|
| (73) | ✓ | ✓ | ✓ | Hormigón/Metal | - |
| (124) | - | - | ✓ | - | Robot |
| (133) | - | - | ✓ | - | Robot |
| (28) | - | - | ✓ | Tuberías | GPS/GIS |
| (115) | - | - | ✓ | - | GPS |
| (113) | - | - | ✓ | - | Ultrasonidos |
| (60) | - | - | ✓ | Acero | CAD |
| (81) | - | - | ✓ | Diversos | LAN |
| (71) | - | - | ✓ | Residuos | Cámara |
| (59) | - | - | ✓ | Tuberías | Cámara |
| (34) | ✓ | ✓ | - | - | - |
| (63) | ✓ | - | - | - | - |

Tabla 2.1: Diferentes soluciones para localizar recursos.

2.2.3.2. Monitorización de la obra

La monitorización es un factor determinante para conseguir medidas precisas del progreso de las obras en un edificio en construcción. Además, esta estrategia ayuda a gestionar la seguridad, los trabajadores y el equipamiento. Todos esos aspectos son evaluados de forma separada mediante sistemas RFID como se muestra en la sección anterior. Sin embargo, existe una variedad de trabajos en los cuales diferentes métodos se integran para evaluar el proyecto en su conjunto. Para cada componente bajo estudio, los procesos de pedido, producción, transporte, almacenamiento, instalación e inspección pueden ser controlados (136).

La combinación de varias tecnologías puede automatizar los sistemas de monitorización, evaluando el progreso de cada uno de los procesos bajo control. Así, escáneres láser y fotogrametría pueden ser empleados para la representación 3D del entorno, RFID y códigos de barras para controlar horas de trabajo y software de modelado con propósitos informativos y de actualización de planos (53). El control del estado de los materiales en un edificio en construcción es una herramienta realmente útil para generar un modelo CAD 4D del entorno y comparar el modelo planeado con el construido (39) (103). Una actualización de la plani-

ficación del proyecto puede llevarse a cabo combinando información procedente de un sistema RFID y de MS Project, presentando el progreso de la construcción del edificio (61).

2.2.4. Seguridad durante el ciclo de vida del edificio

El uso de maquinaria pesada en entornos constructivos incrementa la eficiencia en el trabajo. Sin embargo, estos vehículos son peligrosos y pueden causar accidentes durante el proceso de construcción. A pesar de las condiciones de seguridad en el entorno de trabajo, miles de trabajadores son heridos cada año. El desarrollo de un sistema de alarmas basado en RFID (33) (35) puede alertar a los trabajadores de diferentes riesgos usando información procedente del área bajo construcción.

Una vez que el edificio está terminado y es habitado, la seguridad continúa siendo un factor muy importante a tener en cuenta. Unos de los accidentes más frecuentes y más temidos en los edificios son los incendios. Para extinguir o controlar pequeños incendios, se dispone de extintores y válvulas de seguridad situados estratégicamente en los edificios. Las actividades de mantenimiento de este equipamiento de seguridad son muy frecuentes, por lo que un conjunto de etiquetas RFID pueden adherirse a estos dispositivos con el objetivo de almacenar información acerca del historial y de la condición actual de extintores y válvulas (97).

En algunas ocasiones, el fuego no puede ser controlado y los bomberos deben actuar para evitar un mayor desastre. En estos casos, la automatización de un procedimiento de rescate puede reducir retrasos e incluso salvar vidas. Por tanto, diferentes autores han desarrollado diferentes propuestas como un sistema de navegación para rescates en ambientes peligrosos (41) y una solución basada en RFID la cual envía planos de evacuación del edificio y otros datos acerca del lugar donde se ha producido el incendio a los equipos de rescate.

2.2.5. Evaluación y mantenimiento de edificios

El control de la calidad en los proyectos constructivos es un factor a tener muy en cuenta, especialmente con vistas a detectar posibles defectos que supongan un riesgo o un importante impacto económico. Se ha detectado que entre un 5 y un 10 % del coste de construcción de un edificio es debido a la reposición de componentes defectuosos durante el proceso constructivo (75).

La mayor parte de esos defectos se deben a factores humanos, entre los cuales se encuentra la supervisión ineficiente del proceso constructivo. Una solución a este problema consiste en comparar diferentes componentes estructurales procedentes del modelo 3D del edificio tal como fue planeado con información 3D proporcionada por sensores láser y sensores embebidos (22)(82). Estas tecnologías son combinadas con software de modelado y de gestión del proyecto para registrar los datos adquiridos, reconocer objetos y finalmente, detectar desviaciones y defectos en los componentes constructivos (7).

La introducción de la tecnología RFID ha contribuido a facilitar y automatizar el proceso de mantenimiento y evaluación de edificios. Una de las evaluaciones llevadas a cabo durante el proceso de construcción es el test de los sistemas de drenado. Esta tarea es llevada a cabo normalmente por medio de unas bolas que son lanzadas desde puntos estratégicos del sistema de tuberías, como sanitarios o lavabos, las cuales son controladas a través de las tuberías hasta un punto final. El control de los sistemas de drenado por medio de bolas equipadas con etiquetas RFID permite evaluar de manera simultánea varios tramos del sistema de tuberías, reduciendo el tiempo de operación en un 80 % y la mano de obra a la mitad (84). Además, los resultados obtenidos pueden ser almacenados en las propias etiquetas o en dispositivos PDA, reduciendo errores humanos.

El ciclo de vida de un edificio terminado está estrechamente ligado a su mantenimiento, ya sea en edificios de nueva construcción, ampliados o reformados (37). Estas tareas están vinculadas a inspecciones periódicas de determinados elementos y su reparación o reposición. La gestión de la información relacionada con esos trabajos mejora de forma considerable mediante la adición de tecnologías RFID en el campo de la gestión de edificios (42). Así, la identificación de los

componentes que deben revisarse se lleva a cabo de una forma automática, reduciendo errores y tiempo de operación. El almacenamiento, en etiquetas RFID, de información sobre el estado de cada componente permite la monitorización del equipamiento en tiempo real y gestionar diferentes secuencias de mantenimiento (83).

2.2.6. Otras aplicaciones en interiores

Como se muestra en secciones anteriores, el uso de sistemas RFID es realmente útil durante los procesos de concepción y construcción de un edificio. Sin embargo, una vez que las obras han terminado y el edificio está habitado, determinadas acciones llevadas a cabo en su interior también pueden ser controladas mediante equipamiento RFID.

2.2.6.1. Localización y mapeo

Una de las aplicaciones mencionadas anteriormente es la localización de usuarios u objetos en interiores habitados, así como la generación de mapas del entorno. En los últimos años, muchos investigadores han trabajado para resolver problemas de localización en interiores (ILS, del inglés *Indoor Location Sensing*) con la ayuda de tecnologías de identificación por radio frecuencia. Algunas de estas técnicas y sus resultados son evaluados y comparados en (29) y (91).

En el principio del milenio, se desarrollaron distintos sistemas hardware (69) and software (11)(12), con el fin de estimar la posición de un usuario dentro de un edificio. Estas tecnologías están fundamentadas en analizar la señal recibida (RSSI, del inglés *Received Signal Strength Indication*) por sensores en determinados puntos de control, los cuales cubren un área de interés. De esta manera, los lectores que reciben la señal pueden triangular la posición del usuario. El dominio de trabajo de estos sistemas está en el rango de metros, alrededor del tamaño de una oficina.

Con el objetivo de mejorar la precisión de los sistemas existentes destinados a la localización de diferentes elementos dentro de un edificio y evitando la adición

de más lectores, el sistema LANDMARC (99) propone la instalación de algunas etiquetas activas ubicadas formando una rejilla. Por otro lado, la fusión de los algoritmos LANDMARC y el propuesto por (134) permite la obtención de buenos resultados en diferentes niveles de medida de error. De Amorim (44) mejora el algoritmo LANDMARC mediante una segunda estimación de la posible área en la que un objeto puede ser localizado. También se puede extender el algoritmo LANDMARC para evaluar la posición de determinado objeto en 3D, y no solo en el plano, introduciendo la coordenada z (79).

Los sistemas mencionados previamente son centralizados, lo que implica que requieren un servidor central para calcular la posición del usuario, así como una fuente de alimentación. Con el objetivo de descentralizar el proceso y evitar esta dependencia, se puede instalar un conjunto de balizas (en inglés *beacon nodes*). Estos dispositivos inalámbricos programables replican una firma relacionada con la señal RSSI y permiten calcular la localización de objetos móviles (89).

En determinadas ocasiones, el elemento cuya posición es calculada es un robot móvil. Ubicando varias etiquetas en un entorno habitado y equipando al robot de dos antenas RFID, se puede calcular la posición relativa del dispositivo móvil con respecto a los puntos de referencia. Si además del sistema RFID, el robot dispone de un escáner láser, se puede llevar a cabo un proceso de mapeo del entorno (64)(74). Una vez que el mapa ha sido generado, el robot puede ejecutar diversas tareas de inspección y vigilancia, actuando como un agente de seguridad autónomo (94).

Aunque la localización de un objeto o un usuario en un entorno por medio de tecnología RFID es una aplicación en sí misma, esta operación puede ser asociada a otras tareas. Así, un usuario equipado con un lector RFID puede alcanzar un punto de destino en un medio etiquetado (101). Además, la evaluación de la posición o incluso la orientación del usuario dentro de un edificio puede ser útil para controlar la iluminación de las habitaciones de una forma automática (137) o incluso interactuar con otros elementos o servicios equipados con sistemas RFID.

2.2.6.2. Navegación

Además de la localización de un determinado usuario en un entorno interior y la posibilidad de generar mapas del mismo, la tecnología RFID facilita la navegación en interiores habitados. Debería enfatizarse en este campo sobre la navegación de un usuario en un entorno bajo condiciones especiales (como un incendio o en obras) o incluso desconocido para el usuario.

De la misma manera, personas ciegas o con dificultades de visión pueden tener grandes problemas para moverse en entornos cambiantes o desconocidos. Un sistema RFID puede informar a estas personas sobre el mejor camino entre dos puntos de un edificio por medio de la lectura de determinadas etiquetas ubicadas en el entorno. El sistema es capaz, incluso, de recalcular la ruta si el usuario se ha perdido. Un ejemplo de entorno cambiante puede experimentarse en un supermercado, donde la distribución de estanterías y productos varía con frecuencia. Un sistema RFID puede dar al usuario determinadas órdenes como “seguir recto”, “evitar obstáculo” o “giro” o incluso ayudar al usuario a encontrar el camino hacia un destino concreto (85). Además de esta aplicación, este sistema puede usarse como guía turístico en un museo o como sistema de navegación para ayudar a equipos de rescate en entornos peligrosos (41).

2.3. Integración de tecnología RFID con diferentes sensores en el ámbito de la construcción

El uso de tecnologías RFID en el ámbito de la construcción facilita una enorme variedad de tareas. Sin embargo, una herramienta puede ser mucho más útil y completa si se combinan en ella diferentes tecnologías.

Durante el proceso de construcción de un edificio, desde su concepción hasta su finalización, deben supervisarse multitud de tareas. Con el objetivo de hacer más fáciles estos trabajos y mejorar su eficiencia, estos pueden ser automatizados por medio de ciertos sistemas que implican el uso de diferentes tecnologías. Existe una

gran variedad de publicaciones en las cuales se combinan tecnologías de diversa naturaleza. En las siguientes subsecciones se presentan dos de las combinaciones de sensores más comunes con base en la tecnología RFID.

La Tabla 2.2 resume diferentes soluciones en las cuales determinadas tecnologías son combinadas con la identificación por radio frecuencia.

| | Tecnología complementaria | Propósito |
|-------|----------------------------------|---|
| (52) | Escáner láser | Representación del entorno |
| | Fotogrametría | Representación del entorno |
| | Código de barras | Recogida de horas de trabajo |
| | CAD | Actualización de datos en planos |
| (82) | | Evaluación de la obra |
| | Escáner láser | Control de calidad y detección de defectos |
| | | Detalles en rehabilitación de monumentos |
| | Sensores embebidos | Inspección de elementos en puentes |
| | | Inspección de elementos en edificios |
| (103) | Cámara | Reconocimiento de objetos |
| | <i>Mobile computing</i> | Soporte en comunicación e información adicional para comprobaciones |
| (32) | Escáner láser | Información 3D de la escena |
| (23) | Cámara | Extracción de características de los objetos |
| (70) | Cámara | Estimación de la pose inicial de determinados elementos |
| (125) | Escáner láser | Información 3D de la escena |
| (129) | PDA | Monitorización y control de los procesos de inspección |
| (135) | PDA | Envío de información a oficinas o a sitios en construcción |
| (37) | PDA | Gestión de mantenimiento |
| (83) | Tablet PC | Mantenimiento, gestión de tareas y transferencia de información entre operarios |
| (42) | PDA | Gestión de mantenimiento |
| (112) | PDA | Envío de planos a equipos de rescate |

Tabla 2.2: Características de diferentes combinaciones de tecnologías.

2.3.1. RFID con diferentes sensores

En multitud de tareas, varios usuarios necesitan interactuar con un sistema RFID. Además, cada uno de ellos está equipado con un dispositivo que permite esta comunicación. Debido a las importantes distancias existentes en el interior de los edificios, son necesarios dispositivos inalámbricos, como pueden ser los asistentes personales digitales (PDA, del inglés *Personal Digital Assistant*). La combinación de estas dos diferentes tecnologías puede emplearse en aplicaciones que abarcan desde la fase de concepción de un edificio hasta su utilización.

Antes de comenzar el proceso de construcción, durante la fabricación de componentes de hormigón, un sistema en el que se combinan RFID y dispositivos PDA (129) permite a los trabajadores controlar las tareas de inspección en los laboratorios de pruebas y generar un conjunto de datos que se puede compartir fácilmente. Una vez los elementos son fabricados, su gestión puede ser también controlada por medio de la combinación de tecnologías (135). Así, información ligada a los procesos de inventariado o transporte puede ser enviada o compartida con la oficina de gestión o el lugar bajo construcción.

Otro aspecto a considerar es que la construcción de nuevos edificios está decayendo en los últimos años a favor de la rehabilitación de otros ya habitados. Además, existen edificios cuyos componentes pueden ser reutilizados o cambiados. Estos son los denominados Open Buildings (78). La gestión de elementos que son parte de este tipo de edificios se puede llevar a cabo por medio de un sistema RFID + PDA (37), con el objetivo de ayudar a arquitectos e ingenieros a reanalizar y rediseñar los componentes constructivos.

Una vez que el edificio está habitado, existen ciertos componentes que necesitan labores de mantenimiento. Estos elementos pueden ser parte de la estructura del edificio o corresponderse con material de equipamiento. La instalación de etiquetas RFID en estos componentes permite gestionar información acerca de elementos que necesitan ser reparados o verificados. Además, un proceso de gestión de tareas puede llevarse a cabo con el fin de ordenar los diferentes trabajos a realizar(42) (83).

Como se ha comentado previamente, las tecnologías RFID pueden resultar útiles para controlar y prevenir desastres en edificios. Enviar determinada información, relacionada con el escenario donde se ha desencadenado un incendio, mediante un dispositivo PDA (112) puede ahorrar un tiempo muy preciado en operaciones de rescate.

2.3.2. RFID con visión por computador

Buscando registrar el progreso de un proyecto en construcción, puede desarrollarse un modelo de gestión de tareas y control de presupuestos (52). La implementación de un sistema de códigos de barras o RFID permite controlar la mano de obra y localizar materiales y herramientas. Una representación completa del sitio bajo construcción se puede llevar a cabo por medio de escáneres láser y fotogrametría. De esta forma, pueden detectarse posibles defectos (82). Finalmente, los modelos 3D generados a partir de los datos adquiridos mediante un escáner láser actualizan la información contenida en los planos y compara los modelos planeado y construido (103).

Como se ha mencionado en la sección anterior, durante el ciclo de vida de un edificio, varias operaciones de reconocimiento o mantenimiento se llevan a cabo en diferentes escenarios. Los sistemas de visión pueden ser realmente útiles en estos trabajos. Sin embargo, si los objetos no son visualizados por completo, la tarea de reconocimiento puede volverse muy compleja. En estos casos, un conjunto de etiquetas RFID puede proporcionar al sistema cierta información acerca de los objetos presentes en el escenario y hacer más fácil su reconocimiento. La información obtenida de las etiquetas permite saber qué objetos, entre los almacenados en una base de datos, están presentes en el escenario bajo estudio (32).

Estos sistemas de visión pueden ser cámaras, proporcionando imágenes bidimensionales de las cuales se pueden extraer determinados parámetros de los objetos fotografiados (23) (70) o escáneres láser, los cuales proporcionan información 3D acerca de la escena (32).

En la presente tesis, con el fin de facilitar la labor de reconocimiento de elementos constructivos y mobiliario en un interior habitado, se propone combinar las

tecnologías de visión 3D con otras de identificación por radio-frecuencia (RFID). Los sistemas RFID son capaces de almacenar y recuperar datos de los elementos identificados mediante pequeñas etiquetas (o *tags*) en las cuales estos datos pueden ser fácilmente leídos y escritos. Estas etiquetas pueden ser adheridas o incorporadas a determinados objetos y contienen información relevante acerca de ellos, permitiendo su identificación y el control de algunas de sus características. La idea de combinar RFID y escáneres 3D ha sido escasamente utilizada por otros autores en el campo de la visión con propósitos de reconocimiento. En (32), como se menciona previamente, se plantean experimentos de escenas simples con varios objetos dotados de etiquetas RFID. Se detecta la existencia de un determinado objeto leyendo el código RFID-EPC de la etiqueta adherida al mismo y, posteriormente, se acomete un algoritmo de posicionado. Así, la información sobre la presencia o no de un objeto en la escena simplifica significativamente la complejidad y el tiempo de cómputo en los algoritmos de reconocimiento.

Nótese que un entorno habitado conlleva cierto desorden en el escenario. Por ejemplo, hay objetos desconocidos sobre las mesas, en las estanterías, puede haber papeles adheridos a las paredes y a las ventanas, etc. Además, algunos de los elementos presentes en el escenario pueden ocluir a otros. La combinación de estas dos tecnologías, RFID y visión por computador, permite la generación de modelos semánticos 3D de interiores habitados.

2.4. Conclusiones del capítulo

Una vez evaluados los trabajos realizados en el ámbito de la construcción, con base en tecnologías de visión y de identificación por radio-frecuencia y estudiadas en profundidad las necesidades de adquisición de datos que requiere esta tesis, se decide el empleo de escáneres láser para obtener datos 3D de diferentes entornos interiores.

También se llega a la conclusión de que el procesamiento de la información masiva, procedente de un escáner, se puede aligerar considerablemente si se cuenta con información referente a determinados elementos presentes en el escenario. Así, se decide la instalación de etiquetas RFID en objetos correspondientes al mo-

biliario del interior habitado, las cuales contengan datos vinculados a la geometría de estos muebles.

La combinación de estos dos tipos de tecnologías, con el fin de identificar y posicionar elementos en habitaciones habitadas y generar modelos tridimensionales de dichos entornos, supone una aportación original en el ámbito de actuación de esta tesis doctoral. Esta unión de tecnologías, así como los resultados obtenidos a partir de ella, se estudian con profundidad en los siguientes capítulos.

3 |

Tecnologías utilizadas

En la presente tesis, como ya se ha mencionado, se combinan dos tecnologías de naturaleza muy diferente: escáneres láser y sensores RFID, los cuales permiten la lectura y la escritura de información. En este capítulo se hace una presentación de ambas y se describen los dispositivos específicos empleados a lo largo del trabajo desarrollado.

3.1. Escáneres láser

Actualmente, la tecnología láser es utilizada en muchos aspectos de la vida diaria. El ratón del ordenador, la fotocopidora, la impresora o los CDs son algunos ejemplos de dispositivos que emplean este tipo de tecnología y que utilizamos de forma cotidiana.

La velocidad, la precisión y la resolución de los láseres ha supuesto el desarrollo de instrumentos más complejos que requieren de estas características. Así, en el campo de la medicina se emplean láseres para realizar tratamientos quirúrgicos o en la industria para operaciones de guiado de maquinaria o cortado. En arquitectura, ingeniería civil o arqueología esta tecnología se utiliza, principalmente, en sistemas de medida. Este último ejemplo se explica con más detalle a lo largo de esta sección.

3.1.1. Tiempo de vuelo

Existen diferentes estrategias para usar láseres con el fin de medir la distancia entre el propio sensor y un objeto. Los sistemas de medida de distancia por tiempo de vuelo (TOF, del inglés *Time of Flight*) son, junto con los de triangulación, los más empleados en la construcción de escáneres láser.

En este caso, como muestra la Figura 3.1, el escáner emite pulsos de radiación electromagnética. Tras encontrarse con un objeto a su paso, una parte de esta radiación es absorbida por éste, mientras que el resto es reflejada. La radiación reflejada vuelve al sensor y un reloj interno calcula el tiempo entre la emisión y la recepción del pulso (10).

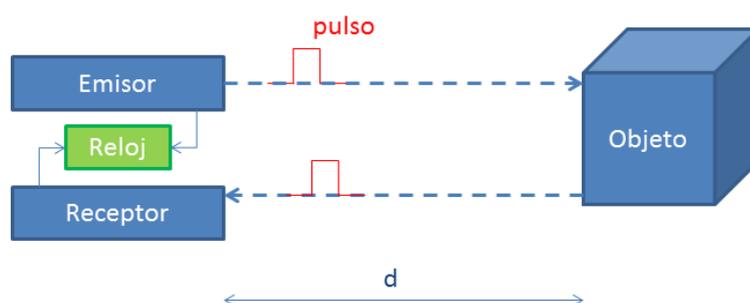


Figura 3.1: Esquema de funcionamiento de un escáner de tiempo de vuelo.

Formalmente, el tiempo transcurrido desde que el pulso sale del escáner hasta que colisiona con el objeto puede calcularse como:

$$t_v = \frac{d}{c} \quad (3.1)$$

donde c es la velocidad de la luz.

Por lo tanto, al ser el viaje realizado por el pulso de ida y vuelta, la distancia entre el sensor y el objeto es:

$$d = \frac{c \cdot t_v}{2} \quad (3.2)$$

La alta velocidad de la luz permite al escáner realizar miles de mediciones por segundo, con una resolución R directamente proporcional a la resolución de tiempo Δt_v , siendo esta magnitud el mínimo periodo de tiempo que el sensor es capaz de medir. Así:

$$R = \frac{c \cdot \Delta t_v}{2} \quad (3.3)$$

3.1.1.1. Riegl VZ-400

Uno de los escáneres empleados para la adquisición de datos 3D de los entornos estudiados en esta tesis es el Riegl VZ-400, como el que aparece en la Figura 3.2. Este sensor es empleado para largas distancias y puede medir hasta 122000 puntos por segundo.



Figura 3.2: Escáner Riegl VZ-400.

El escáner láser está montado sobre un trípode que permite su fácil desplazamiento y posicionamiento en el escenario. También cuenta con un sistema mecánico en la base que permite girar el escáner para modificar el área de sensado y así obtener información de mayor parte del entorno (marcado en rojo en la Figura 3.3).



Figura 3.3: Soporte sobre el que se monta el escáner.

Asimismo, el sensor cuenta con un receptor GPS integrado, que permite disponer de las coordenadas globales del entorno bajo estudio. El sistema también tiene instalada una cámara fotográfica, la cual permite obtener información de color de los elementos sensados.

Funcionamiento del escáner

El mecanismo de *escaneo de línea* del VZ-400 se basa en un rápido espejo poligonal multi-faceta, el cual proporciona líneas unidireccionales y paralelas de puntos 3D correspondientes a los objetos sensados.

La Figura 3.4 ayuda a comprender la estructura y el funcionamiento de este escáner láser.

La refracción vertical (o *line scan*) del haz láser (número 1 en la Figura 3.4) se lleva a cabo mediante un espejo poligonal [2] de varias caras. Para altas velocidades de escaneo y/o valores del ángulo θ hasta 100° , el espejo rota de forma continua a una velocidad ajustable. Para velocidades de escaneo más bajas o ángulos θ pequeños, el espejo oscila hacia arriba y hacia abajo. Un escaneo horizontal de 360° se lleva a cabo girando el escáner en torno al eje vertical [3].

Los datos referentes al escaneo consisten en: rango, ángulo y amplitud de la señal, los cuales son registrados en un dispositivo de almacenamiento USB [8] o transmitidos a un computador [10] vía TCP/IP [5]. La cámara [9] es controlada

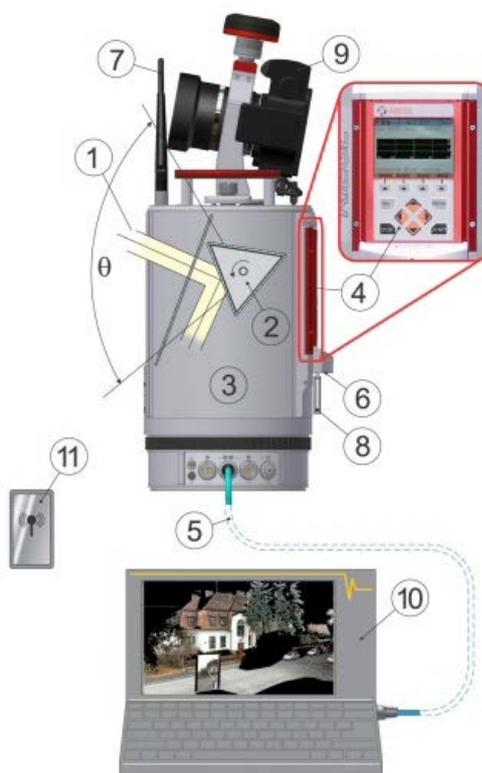


Figura 3.4: Esquema de conexión y funcionamiento del Riegl VZ-400.

por el sistema y las imágenes adquiridas son transmitidas junto a los datos de escaneo.

El dispositivo es configurado y operado mediante un display de interacción humano-máquina (HMI, del inglés *Human Machine Interface*) [4] o vía WLAN [7] mediante un dispositivo móvil [11] o un ordenador [10]. Como se ha mencionado previamente, el ordenador también puede conectarse a través de la interfaz TCP/IP [5] ubicada en la parte fija del dispositivo.

Especificaciones técnicas

A continuación se muestran las principales características y parámetros del escáner. En primer lugar, la Figura 3.5 refleja el rango de distancias en los que el escáner puede obtener información, en función de la reflectancia de los materiales escaneados y las condiciones climatológicas.

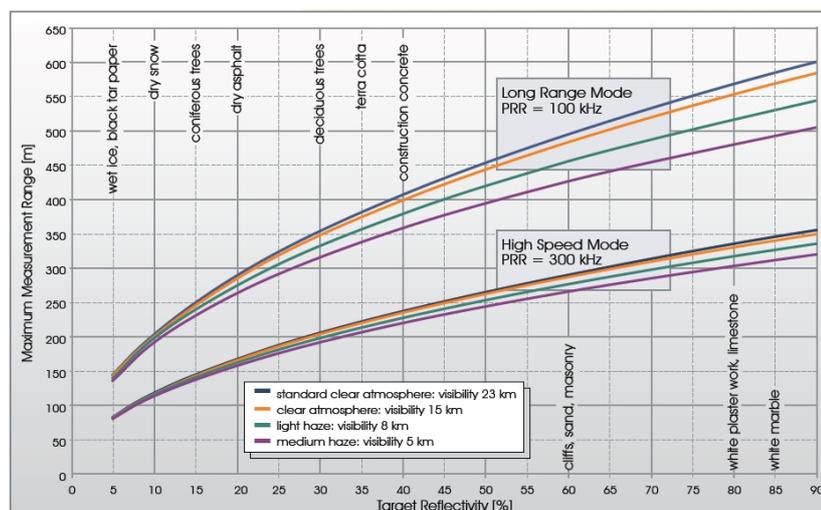


Figura 3.5: Rango de medida del Riegl VZ-400.

Como puede apreciarse, en el peor de los casos: con baja visibilidad y con elementos cuya reflectancia es mínima, se obtendrían datos a 50 metros del escáner. Por tanto, se puede afirmar que el escáner es adecuado para llevar a cabo los trabajos propuestos en esta tesis.

La Tabla 3.1 muestra las principales características técnicas del escáner láser Riegl VZ-400, vinculadas al rango de actuación del sensor.

El parámetro *alcance* indica las distancias mínima y máxima de las que el escáner puede obtener datos. La *velocidad de medición* hace referencia a la cantidad de datos que el sensor es capaz de adquirir por unidad de tiempo. El láser es de *clase 1*, seguro en condiciones de utilización razonablemente previsibles, no afectando a la visión directa. Como puede apreciarse, la *longitud de onda* es cercana al infrarrojo. El parámetro *precisión* está vinculado al grado de conformidad de una cantidad medida con el valor real y la *reproducibilidad* o repetitividad hace referencia al grado con el cual futuras medidas presentarán el mismo resultado.

Las características vinculadas a la adquisición de datos por medio de este escáner se presentan en la Tabla 3.2. Como se puede apreciar, los datos son diferentes en las direcciones vertical y horizontal.

| | |
|--|-----------------------------------|
| Alcance | De 1.5 m a 600 m (ver Figura 3.5) |
| Velocidad de medición | hasta 122000 puntos/segundo |
| Capacidad del láser | 9 mW (Laser Class 1) |
| Longitud de onda | 1550 nm |
| Frecuencia de repetición de pulso | 100 kHz - 300kHz |
| Precisión | 5 mm |
| Reproducibilidad | 3 mm |

Tabla 3.1: Rango de actuación del escáner Riegl VZ-400.

El parámetro *rango angular* indica el espacio del que el escáner es capaz de adquirir información. En cuanto a la *velocidad de escaneo*, ésta puede ser ajustada en función de la distancia a la que se encuentre el objeto y de la densidad de puntos deseada. En cuanto al *ancho de paso angular*, este parámetro indica la distancia entre haces de láser consecutivos en el caso de $\Delta\theta$ y entre líneas de escaneo en $\Delta\phi$.

| | Dirección vertical | Dirección horizontal |
|---|--|--|
| Rango angular | 100° | 360° |
| Mecanismo de escaneo | Espejo multi-faceta rotativo | Rotación del dispositivo |
| Velocidad de escaneo | De 3 a 120 líneas por segundo | De 0° a 60° por segundo |
| Ancho de paso angular. $\Delta\theta$ (vertical) y $\Delta\phi$ (horizontal) | $0,0024^\circ \leq \Delta\theta \leq$ 0,288 | $0,0024^\circ \leq$ $\Delta\phi \leq 0,5$ |

Tabla 3.2: Especificaciones de la adquisición de datos del escáner Riegl VZ-400.

3.1.2. Cambio de fase

Una variante de la medida de distancia por TOF es el método denominado *cambio de fase* (10). Mediante esta tecnología, se obtiene una mayor precisión en las medidas. En este caso, el láser emite una onda continua que transporta una señal modulada. La fase de las señales emitida y recibida son comparadas y la distancia entre el escáner y el objeto sensado se calcula a partir de esta diferencia de fase (ver Figura 3.6).

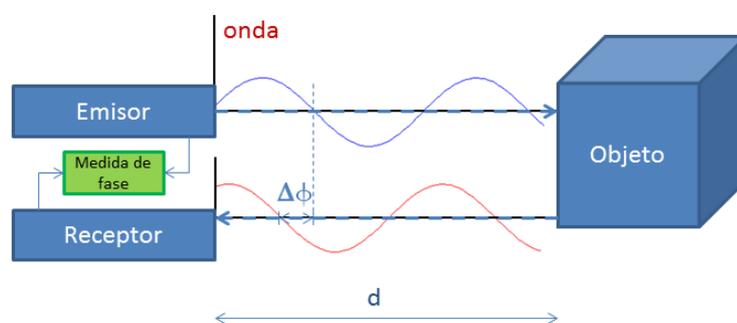


Figura 3.6: Esquema de funcionamiento de un escáner de cambio de fase.

Si el láser emite una señal continua de tipo sinusoidal, la onda reflejada por el objeto es recibida por el sensor, como en el caso anterior, transcurrido un tiempo t . Pero en este caso, el periodo T de la señal es conocido y por tanto, el tiempo transcurrido entre emisión y recepción de la onda es directamente proporcional a la diferencia de fase entre la señal emitida y la recibida ϕ (130). Así,

$$t = \frac{\phi}{2\pi}T + nT \quad (3.4)$$

siendo n el número de longitudes de onda incluidas en la distancia recorrida.

Si se representa el periodo como el inverso de la frecuencia f , se obtiene:

$$t = \frac{\phi}{2\pi} \frac{1}{f} + \frac{n}{f} \quad (3.5)$$

Sustituyendo la ecuación 3.3 en 3.7, se calcula la distancia entre el escáner y el objeto sensado como:

$$d = \frac{c}{2} \left(\frac{\phi}{2\pi f} + \frac{n}{f} \right) \quad (3.6)$$

Si se considera que el parámetro n es el mismo en el trayecto de ida que en el de vuelta, la máxima diferencia de fase que se puede medir para obtener un resultado no ambiguo es $\phi_{max} = 360^\circ$. En el caso de que el número de longitudes de onda n no fuese el mismo en los procesos de emisión y recepción, la distancia calculada puede ser ambigua. También sería ambigua la medida de la distancia si no existiera desfase entre las dos ondas (ver Figura 3.7). En este caso, la distancia calculada sería igual a 0. Con el fin de eliminar esta ambigüedad, el láser no emplea una sola modulación de onda sino tres diferentes (sin ser múltiplos entre sí), que serán procesadas en paralelo.

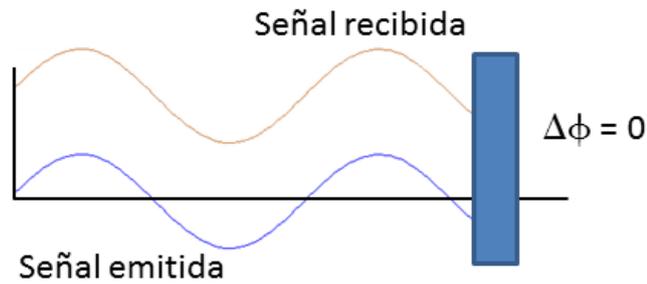


Figura 3.7: Ambigüedad en la medida de cambio de fase.

Por tanto, si no se tiene en cuenta la contribución de los periodos completos, la ecuación 3.4 se reduce a:

$$d = \frac{c \cdot \phi}{4\pi f} \quad (3.7)$$

En este caso, la resolución R será inversamente proporcional a la frecuencia. Así, para modulaciones a altas frecuencias (bajas longitudes de onda) se obtiene una mejor resolución (bajo valor de R).

$$R = \frac{c \cdot \Delta\phi}{4\pi f} \quad (3.8)$$

3.1.2.1. Faro Photon 80

El otro escáner láser utilizado para la toma de datos en los entornos interiores bajo estudio es un Faro Photon 80 (ver Figura 3.8). El Photon 80 es capaz de adquirir información de objetos situados a una distancia de 80 metros.



Figura 3.8: Escáner Faro Photon 80.

Como en el caso del Riegl VZ-400, el dispositivo se monta en un trípode para facilitar su posicionamiento en el escenario bajo estudio. La instalación de un soporte permite acoplar una cámara réflex, que proporciona información de color para cada punto 3D sensado.

Funcionamiento del escáner

La Figura 3.9 sirve como base para entender la adquisición de datos por medio del escáner Faro Photon 80.

El escáner emite un haz láser a un espejo rotativo (1 en la Figura 3.9). Este espejo desvía el haz hacia el área que va a ser sensada. El giro del espejo distribuye el haz láser en un rango de 320° y el giro del dispositivo respecto de su eje vertical, permite cubrir 360° , tal y como muestra la Figura 3.10.

Este haz es reflejado al escáner por los objetos que se interponen en su camino. La distancia entre el escáner y cada objeto, así como los ángulos relativos (tanto vertical como horizontal), son calculados por la unidad de control de procesos del sistema [6]. Los datos capturados son enviados al computador [7] vía WLAN o TCP/IP [4] con el fin de calcular las coordenadas 3D de cada punto sensado.

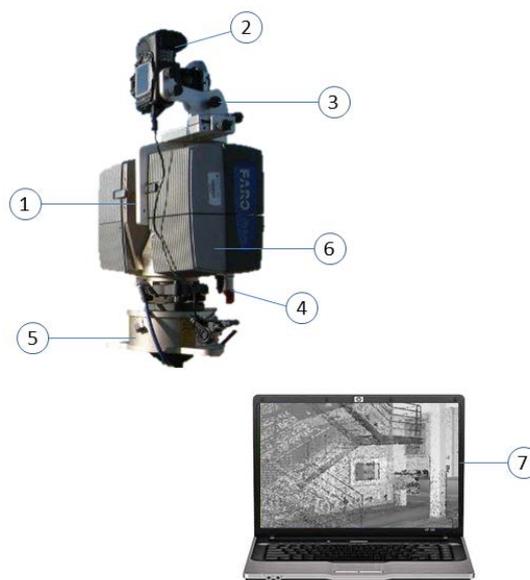


Figura 3.9: Esquema de conexión y funcionamiento del Faro Photon 80.

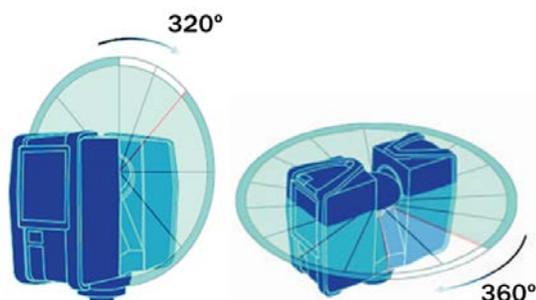


Figura 3.10: Rango de trabajo del Faro Photon 80.

Como ocurre con el escáner Riegl, el dispositivo cuenta con una cámara fotográfica [2] acoplada al sistema mediante una estructura metálica [3]. Las diferentes imágenes adquiridas durante el proceso de escaneo son enviadas al computador junto con los datos referentes a la geometría del entorno.

El sistema está dotado de una batería [5] que le proporciona autonomía suficiente para adquirir datos desde diferentes posiciones del entorno.

Especificaciones técnicas

A continuación se presentan diferentes especificaciones técnicas que determinan

el rango de actuación y la precisión del escáner. En primer lugar, la Tabla 3.3 muestra las características de este escáner en cuanto a rango de actuación se refiere.

| | |
|------------------------------|---|
| Alcance | De 0.6 m a 76 m |
| Velocidad de medición | hasta 120000 puntos/segundo |
| Capacidad del láser | 20 mW (Laser Class 3R) |
| Longitud de onda | 785 nm |
| Precisión | 2 mm a 25 m |
| Repetitividad | 10 m: 0.45/0.9 mm, 90 % refl 0.75/1.5 mm, 10 % refl 25 m: 0.6/1.2 mm, 90 % refl 1.45/2.9 mm, 10 % refl |

Tabla 3.3: Rango de actuación del escáner del escáner Faro Photon 80.

Aunque la mayoría de los parámetros son definidos en el apartado 3.1.1.1, es conveniente profundizar en algunas características. El láser es de clase 3R, por lo que su visión directa es potencialmente peligrosa. Por tanto, durante la adquisición de datos es recomendable el empleo de gafas de protección. Los valores vinculados a la *repetitividad* se muestran para información neta/información bruta. Para obtener los datos netos, se aplica (según el fabricante) un filtro compresor de ruido.

Con respecto a la adquisición de datos 3D, diferentes parámetros se definen en la Tabla 3.4.

| | Dirección vertical | Dirección horizontal |
|------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Rango angular | 320° | 360° |
| Mecanismo de escaneo | Espejo rotativo | Rotación del dispositivo |
| Ancho de paso angular | 0.009° | 0.00076° |

Tabla 3.4: Especificaciones de la adquisición de datos del escáner Faro Photon 80.

Como se puede apreciar, tanto los valores de ancho de paso angular como los de precisión y repetitividad son menores en el caso de este segundo escáner para

distancias cortas, haciendo más aconsejable su uso para el sensado de espacios interiores.

3.2. Sensores RFID

Un sistema RFID (ver Figura 3.11) está compuesto principalmente de un transmisor-receptor (llamado lector), el cual está conectado a una antena, y un conjunto de transpondedores o etiquetas (*tags*, en inglés) en las cuales se almacena determinada información. El lector se comunica con un computador por medio de una aplicación que gestiona la información almacenada en las etiquetas.

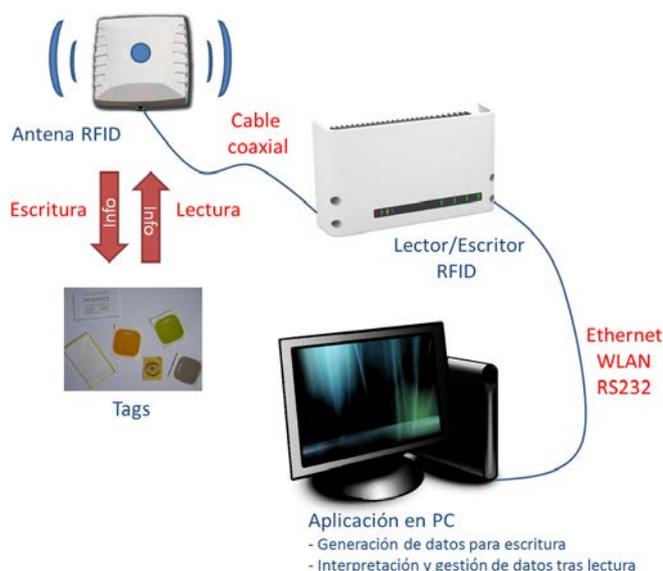


Figura 3.11: Ejemplo de un sistema RFID.

Las antenas establecen la comunicación entre el lector y las etiquetas. Dependiendo de la distancia entre el sistema y los objetos a los que están adheridas las etiquetas, existen diferentes tipos de antenas y etiquetas. La Tabla 3.5 muestra las diferentes bandas de operación y su rango de acción.

En un edificio habitado se necesita controlar cierta información vinculada a determinados componentes o incluso a personas que se encuentran dispersas en el entorno. Por lo tanto, se trata de distancias de hasta decenas de metros. Como

| Banda | Rango de frecuencia | Rango de distancia | Ejemplos de aplicaciones |
|----------------|-----------------------------|--|----------------------------|
| [125-150] kHz | Baja frecuencia (LF) | <20 cm | Identificación de animales |
| [13.56] MHz | Alta frecuencia (HF) | <20 cm | Acceso y seguridad |
| [433-928] MHz | Ultra Alta frecuencia (UHF) | 433-864 MHz <100 m 865-928 MHz <2 m | Logística |
| [2.45-5.8] MHz | Microondas | <2 m | Control de vehículos |
| [3-10.5] GHz | Banda Ultra Amplia (UWB) | <10 m | En fase de investigación |

Tabla 3.5: Bandas de operación para tecnologías RFID.

se muestra (marcado en rojo) en la Tabla 3.5, en la mayoría de los casos, las antenas utilizadas para el control de la ubicación de materiales o personal son de tipo UHF.

Como se ha mencionado antes, la información intercambiada por el sistema RFID se almacena en dispositivos denominados *tags*. El rango de acción del sistema también está influenciado por el tipo de etiquetas que se adhieren a los objetos. Estos dispositivos están formados por dos componentes principales: un circuito integrado que almacena y procesa la información, modula la señal y recibe energía del lector (si es necesario); y una antena que emite y recibe la señal.

Existen tres tipos de etiquetas: activas, pasivas e híbridas. Las etiquetas activas incorporan una fuente de alimentación y transmiten la señal al lector. Por otra parte, las etiquetas pasivas obtienen la energía requerida de los lectores. Este tipo de etiquetas posee un rango de acción limitado a unos 15 metros, mientras que las activas pueden ser utilizadas para distancias de hasta 500 metros. Finalmente, las etiquetas híbridas pueden transmitir, pero se les tiene que indicar que

lo hagan por medio de una señal. La Tabla 3.6 muestra las diferencias existentes entre los distintos tipos de etiquetas.

| | Etiquetas activas | Etiquetas pasivas | Etiquetas híbridas |
|------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Rango de acción | Hasta 500 m | <15 m | >100 m |
| Alimentación | Baterías | Inducida por el lector | Activadas por una señal |
| Coste relativo | >1 | 1 | ≫ 1 |

Tabla 3.6: Tipos de etiquetas RFID.

3.2.1. Lector FEIG OBID LRU 3500

Para los trabajos desarrollados en esta tesis, se ha empleado un lector/escritor FEIG OBID LRU 3500 como el que aparece en la Figura 3.12. En función de la antena conectada al mismo y de las etiquetas utilizadas, se consigue un mayor o menor rango de lectura. En el presente trabajo, las antenas utilizadas permiten enviar y recibir señales de ultra alta frecuencia (UHF, del inglés *Ultra High Frequency*).



Figura 3.12: Lector FEIG OBID LRU 3500 y antena UHF.

Las principales características del lector se muestran en la Tabla 3.7.

| | |
|-----------------------------|---|
| Alimentación | 24 V DC o Ethernet |
| Rango de lectura | 16 m |
| Entorno de actuación | Ambientes con ruido y componentes metálicos. Más de 150 etiquetas |
| Etiquetas soportadas | EPC Class 1 Gen2, ISO 18000-6-B, ISO 18000-6-C |
| Conectores de antena | 4 |
| Interfaces | RS232, RS485, Ethernet, USB |
| Regulación de radio | EN 302 208 |
| Seguridad | EN 60950 y EN 50364 |

Tabla 3.7: Especificaciones del lector FEIG OBID LRU 3500.

El sistema puede ser alimentado mediante conexión a la red eléctrica o a través de un cable de red. Al lector pueden conectarse directamente hasta cuatro antenas de forma simultánea, permitiendo alcanzar un rango de acción de 16 metros, aunque en los trabajos llevados a cabo una única antena ha sido suficiente. Se puede obtener información de tres tipos de etiquetas diferentes, habiendo elegido para la tesis las de tipo EPC Class 1 Gen2. La conexión al computador puede llevarse a cabo mediante puertos RS-232, RS-485, USB o Ethernet. En el caso de los entornos 1 y 2, el lector se ha conectado al PC mediante un cable de red, mientras que en el entorno 3, la transferencia de datos se ha llevado a cabo a través de USB.

Una de las principales dudas que presenta la tecnología RFID es que no se sabe cómo ni en qué medida puede afectar al cuerpo humano. Es por ello que se establecen una serie de normas (diferentes para Estados Unidos, Europa y Japón) que establecen unos límites en su uso, principalmente relacionados con la frecuencia de las antenas. Así, en Europa, las principales normas que rigen este uso son: EN 302 208, estableciendo un máximo de potencia de 2 W en los equipos RFID; EN 60950, relacionada con el voltaje en equipos de tecnología de la información y EN 50364, vinculada a la exposición humana a los campos

electromagnéticos emitidos por dispositivos que funcionan dentro del rango de frecuencias de 0 Hz a 300 GHz, utilizados en RFID entre otras aplicaciones.

3.2.1.1. Antena ID ISC.ANT.U270/270-EU

Como su propio nombre indica, estas antenas están especialmente diseñadas para su uso en el rango de frecuencias permitido en Europa, esto es entre 865 MHz y 868 MHz. Como se ha mencionado anteriormente, el rango de acción del sistema está influenciado por el tipo de antena instalada en el lector. Así, el uso de una antena de ultra-alta frecuencia, permite una comunicación en el rango de hasta 16 metros, lo cual se ajusta a las necesidades de este trabajo.

Este tipo de antena tiene una clase de alta protección IP 65, que no permite el paso de polvo y está protegida frente chorros de agua. Por tanto, es adecuada para su uso en entornos exteriores e interiores.

La polarización circular de la antena permite la identificación de transpondedores en diferente orientación.

3.2.1.2. Etiquetas

El lector empleado en esta tesis, como se menciona anteriormente, permite el uso de diferentes estándares de etiquetas. De entre ellas, se ha elegido el modelo EPC de Clase 1 y segunda generación.

Este tipo de etiquetas permite operar en entornos RFID UHF entre 860 y 960 MHz. Son de tipo pasivo, con lo cual son activadas por el lector y están dotadas de una memoria de lectura-escritura de 96 bits.

3.3. Integración de tecnologías

Las tecnologías descritas a lo largo de este capítulo son integradas bajo un mismo sistema, como se muestra en la Figura 3.13. Las dos tecnologías están conectadas por medio de un bloque específico de integración. El tratamiento de

información 3D procedente de la escena, representado por el bloque “Técnicas de visión 3D”, considera tanto el proceso de adquisición como el de procesamiento de datos 3D, obtenidos mediante un sensor de rango.

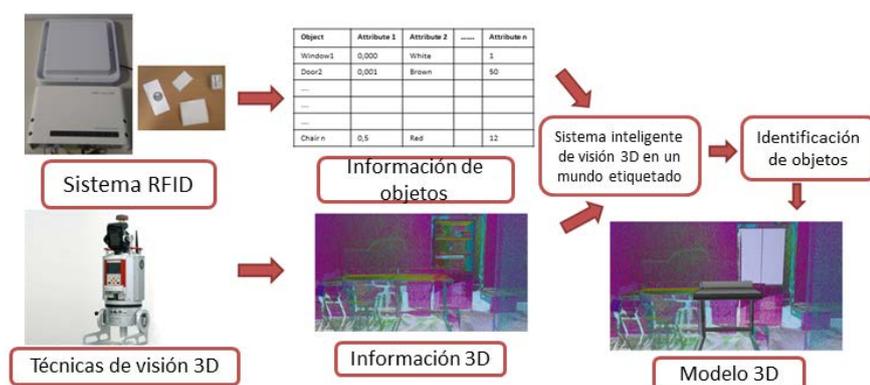


Figura 3.13: Sistema propuesto en esta tesis, donde se combinan tecnologías de visión 3D y RFID.

Considerando una generación automática del modelo del escenario escaneado, es necesario reconocer los elementos presentes en el entorno estudiado. La tecnología RFID asiste a las de visión en esta tarea, proporcionando información relevante que ayuda a identificar y posicionar los elementos en la escena. El bloque “Sistema RFID” representa el tratamiento de la información almacenada en un conjunto de etiquetas RFID una vez que los datos han sido registrados mediante un lector conectado a una antena.

Como se desarrolla en capítulos posteriores, los elementos que conforman un escenario interior se han dividido en dos grupos bien diferenciados:

- **Elementos estructurales.** Estos componentes son aquellos que forman parte de la estructura de la habitación, como son: paredes, suelo, techo y columnas, así como los huecos existentes en los muros correspondientes a puertas y ventanas.
- **Elementos no permanentes.** Son objetos presentes en el escenario cuya posición puede variar en función de las necesidades de los usuarios, y/o que pueden ser retirados de la habitación. Dentro de este grupo se encuentran piezas de mobiliario, como: sillas, mesas, armarios y papeleras.

Para la identificación y posicionamiento de componentes de tipo estructural, es suficiente la información geométrica del entorno adquirida por el escáner láser. Sin embargo, a la hora de reconocer y ubicar los elementos no permanentes en la escena, los datos contenidos en las etiquetas RFID permiten hacer más sencillas las tareas de identificación. Así, información referente a la geometría de los muebles (número de patas de una silla, altura del tablero de una mesa . . .) que está almacenada en las etiquetas, es obtenida por el sistema RFID e introducida en los algoritmos de identificación y posicionamiento de elementos no permanentes, junto con los datos 3D sensados por el escáner láser.

3.4. Conclusiones del capítulo

En el presente capítulo se han presentado las diferentes tecnologías empleadas en la adquisición de datos en los escenarios estudiados en esta tesis. Asimismo, se ha mostrado cómo se lleva a cabo la combinación de los distintos sensores, fusionando la información obtenida y facilitando así la identificación de los elementos que forman parte de cada escena.

Con respecto a los escáneres láser, se ha presentado la tecnología de tiempo de vuelo así como su variante de cambio de fase. A continuación, se han mostrado los sensores utilizados en las diferentes evaluaciones llevadas a cabo, haciendo referencia a sus características.

En cuanto a tecnologías inteligentes, se ha hecho una introducción a los sistemas RFID, indicando cómo se establece la comunicación entre sus componentes y presentando los diferentes tipos de antenas y etiquetas que pueden utilizarse en función de los requerimientos. Posteriormente, se ha hecho hincapié en el sistema empleado en esta tesis, haciendo una descripción de sus características.

Una vez presentadas las tecnologías utilizadas en los distintos experimentos realizados, se procede a documentar cómo se gestionan los datos obtenidos. En los dos siguientes capítulos se abordará el tratamiento de la información adquirida mediante estos dispositivos con el objetivo de generar modelos de información de edificios.

4 |

Modelo BIM: Estructuras básicas de interiores

A lo largo de este capítulo y del siguiente se presentan los procesos llevados a cabo para identificar, segmentar y posicionar los elementos estructurales y no permanentes de una nube de puntos correspondiente a una estancia interior habitada (edificios públicos, viviendas particulares, etc.).

4.1. Introducción

La estructura básica de un entorno interior está definida por elementos constructivos permanentes, los cuales están relacionados entre sí mediante vínculos de posición. Así, dos muros se unen formando una arista, cuya intersección con el suelo o el techo da lugar a un vértice. Del mismo modo, se identifican en las paredes determinadas regiones sin datos 3D, las cuales se corresponden con la posición de puertas y ventanas. El estudio de estos elementos y la relación existente entre ellos, permite hablar de la elaboración de modelos BIM.

La primera tarea en el proceso de generación de un modelo BIM estructural consiste en obtener los datos 3D correspondientes a la geometría de la escena. Tras ubicar el escáner en determinadas posiciones estratégicas del entorno, las diferentes nubes de puntos adquiridas son registradas según se indica en el apartado 6.1.4.

Una vez que la información 3D está bajo un mismo sistema de coordenadas, se procede a segmentar los diferentes componentes estructurales que forman parte de la habitación. Este proceso se refleja en el diagrama de flujo representado en la Figura 4.1.

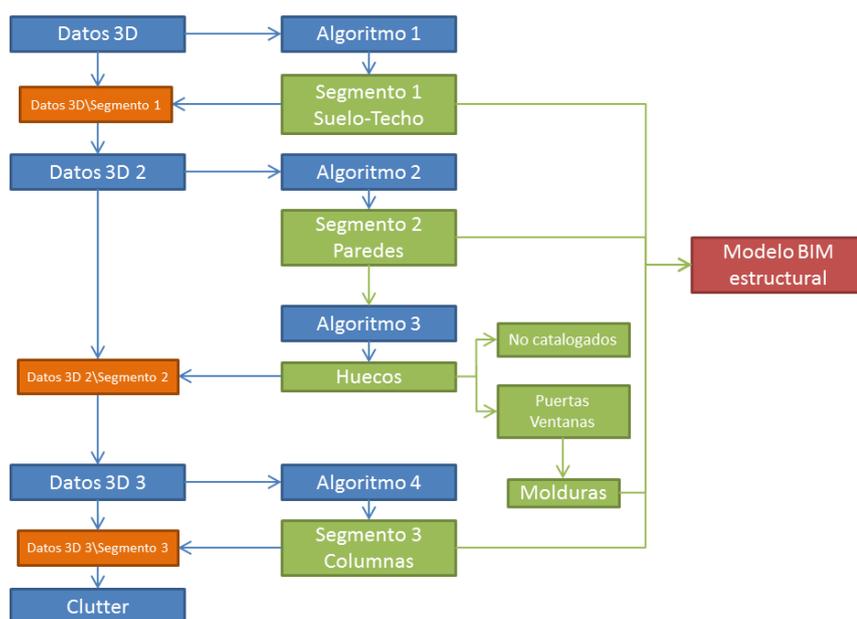


Figura 4.1: Diagrama de bloques de la segmentación de elementos estructurales.

De inicio, se identifican y segmentan las zonas correspondientes al suelo y al techo. Estos componentes estructurales son comunes a todos los interiores y se consideran paralelos entre sí. Una vez definidos el suelo y el techo, los puntos 3D pertenecientes a estos elementos son eliminados de la nube de puntos global con el objetivo de hacer más ligeros los cálculos posteriores. A continuación, se ejecuta un algoritmo que permite identificar y segmentar los muros que determinan el contorno de la habitación. Posteriormente, se evalúa cada una de las paredes con el propósito de detectar la existencia de huecos. Estos huecos pueden pertenecer a ventanas y puertas, los cuales pueden estar o no rodeados por molduras y son objeto de estudio en esta tesis. También se pueden identificar otro tipo de huecos “no catalogados”, que pueden ser producidos por oclusiones o bien corresponderse con zonas sin datos 3D. Una vez determinados los muros e identificados los huecos, el conjunto de puntos 3D relacionados con estos componentes son retirados

de la nube de puntos, como en el caso anterior. Finalmente, en los puntos 3D restantes se estudia la presencia de columnas, determinando su forma, posición y orientación.

Finalmente, el estudio de la relación existente entre los diferentes elementos posicionados en el escenario permite generar un modelo BIM del entorno interior.

4.2. Determinación de las estructuras de contorno

Todas las operaciones citadas en el apartado anterior se estudian con profundidad en esta sección.

4.2.1. Segmentación de suelo y techo

Tras registrar las nubes de puntos bajo un mismo sistema de referencia, se obtiene un conjunto desestructurado de datos 3D, dando lugar a varios millones de puntos inconexos que deben ser tratados para producir un modelo de información a alto nivel. Por tanto, la primera tarea que se plantea es la estructuración de la nube de puntos. Para ello, y como se propone en (5), se procede a discretizar el espacio de trabajo mediante una malla regular de cubos diminutos denominados vóxeles. Esta división del entorno permite establecer relaciones entre diferentes regiones del espacio, facilitando las labores de tratamiento de la información 3D.

Este proceso de discretización del espacio, conocido como voxelización, es uno de los principales problemas que se presentan a la hora de llevar a cabo la detección automática de las paredes, en el sentido de cuál es el mejor tamaño de vóxel y dónde se sitúa el origen del espacio de vóxeles. En (4) (6) este aspecto no es abordado.

En el presente apartado se estudia la optimización del tamaño de vóxel, permitiendo ajustar simultáneamente y de una forma más precisa, el suelo, el techo y las paredes de una habitación rectangular a planos de vóxeles. Así, un plano

de vóxeles contiene la mayoría de los puntos 3D de cada elemento estructural. De aquí en adelante, la palabra “muro” será usada indistintamente para hacer referencia a cualquier estructura plana del interior bajo estudio (suelo, techo o pared).

En primer lugar, se aborda la identificación y la segmentación del suelo y del techo de la habitación. El método propuesto en esta sección asume que, como es usual en el ámbito de la construcción, el suelo y el techo son estructuras paralelas. Esta propuesta se basa en crear una discretización óptima del espacio (de aquí en adelante llamada “espacio vóxel”) y definir, de una forma precisa, los planos que contienen el máximo número de puntos correspondientes al suelo y al techo.

Formalmente, el espacio vóxel puede definirse en un Sistema Universal de Coordenadas (UCS, del inglés *Universal Coordinates System*) por medio del tamaño de los vóxeles $(\varepsilon, \delta, \sigma)$ y las coordenadas de los centroides de los mismos (v_x, v_y, v_z) , siendo v_z la altura de los vóxeles, de acuerdo con el contexto constructivo.

Asumiendo vóxeles del tipo $\varepsilon = \delta = \sigma$, el objetivo de este proceso es determinar el tamaño mínimo de vóxel, caracterizado por el parámetro ε , y la primera coordenada del plano de vóxel v_z . Este plano de vóxel contendrá el máximo número de puntos pertenecientes a un muro. Una vez la voxelización del espacio se ha llevado a cabo, la mayoría de los puntos pertenecientes, por ejemplo, al suelo son contenidos en un estrecho paralelepípedo M cuya altura es ε (Ver Figura 4.2). La incertidumbre en ε puede ser limitada por medio de las especificaciones de planicidad recogidas en los estándares constructivos.

El balance entre el tamaño de los vóxeles y el número de puntos del muro contenido en M es regulado por la función 4.1, en la cual $p(\varepsilon, v_z)$ es el porcentaje de puntos 3D del espacio próximo al muro contenidos en M . Por tanto, esta función evalúa el porcentaje de puntos del muro que están contenidos en el plano de vóxeles en función del tamaño de los vóxeles. La Figura 4.2 muestra la voxelización del espacio de acuerdo con la definición del volumen M para el suelo (M_a) y para el techo (M_b).

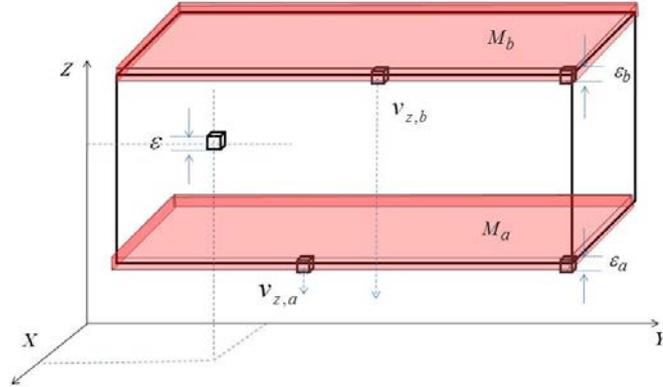


Figura 4.2: Representación del espacio voxelizado.

$$F(\varepsilon, v_z) = \frac{p^2(\varepsilon, v_z)}{\varepsilon} \quad (4.1)$$

Con el objetivo de obtener el máximo valor de la función F , lo que implica incluir el máximo número de los datos del muro en un plano de vóxeles, ε y v_z están restringidos a un rango de valores.

Por un lado, ε está limitado por el rango $[\varepsilon_1, \varepsilon_2]$, donde ε_1 corresponde a la precisión del escáner (en este caso, 1 cm) y ε_2 está determinado por la tolerancia de planicidad, establecida por la especificación internacional DIN 18202.

Algoritmo 1 Cálculo de los valores óptimos ε' y v'_z

- 1: $F(\varepsilon, v_z) \leftarrow$ Distribución de datos 3D en el eje Z
 - 2: $m \leftarrow$ Función gaussiana ajustada
 - 3: $\text{máx } F \leftarrow F(\varepsilon_1, m)$
 - 4: **para** cada $\varepsilon \leftarrow \varepsilon_1$ a ε_2 **hacer**
 - 5: **para** cada $z \leftarrow (m - \varepsilon)$ a $(m + \varepsilon)$ **hacer**
 - 6: $F(\varepsilon, z)$
 - 7: **si** $F(\varepsilon, z) > \text{máx } F$ **entonces**
 - 8: $\text{máx } F \leftarrow F(\varepsilon, z); \varepsilon' \leftarrow \varepsilon; v'_z \leftarrow z$
 - 9: **fin si**
 - 10: **fin para**
 - 11: **fin para**
-

Por otro lado, v_z es inicializado en la posición m , que corresponde al valor máximo de la función de distribución gaussiana de puntos en el muro a lo largo del eje Z . Para cada valor de ε en el rango $[\varepsilon_1, \varepsilon_2]$ el valor de v_z se evalúa en el intervalo $[m - \varepsilon, m + \varepsilon]$ y la función F es calculada. Una vez finalizado este proceso, el valor máximo de F (máx F en el Algoritmo 1) proporciona los valores óptimos ε' y v'_z .

Si el algoritmo es aplicado de forma separada para el suelo y el techo, se generan dos configuraciones de espacio vóxel diferentes. Sean $(v'_{z,a}, \varepsilon'_a)$ y $(v'_{z,b}, \varepsilon'_b)$ la posición y el tamaño de vóxel calculados para el suelo y el techo de la habitación.

A continuación, se propone una nueva función G , que integra ambas propuestas de voxelización. La ecuación 4.2 impone un único tamaño de vóxel E y las posiciones de planos de vóxeles $V'_{z,a}$ y $V'_{z,b}$, obteniendo el valor máximo de G el cual proporciona los mejores planos de vóxeles simultáneos para el suelo y el techo. La nueva función a optimizar es la siguiente:

$$\arg \max_{\Omega} \{G(E, V_{z,a}, V_{z,b})\} \quad (4.2)$$

$$\Omega = E \in [\varepsilon'_1, \varepsilon'_2], V_{z,a} \in \left[v'_{z,a} - \frac{\varepsilon'_a}{2}, v'_{z,a} + \frac{\varepsilon'_a}{2}\right], V_{z,b} \in \left[v'_{z,b} - \frac{\varepsilon'_b}{2}, v'_{z,b} + \frac{\varepsilon'_b}{2}\right],$$

$$G\{E, V_{z,a}, V_{z,b}\} = p_a(E, V_{z,a}) + p_b(E, V_{z,b})$$

donde p_a y p_b son los porcentajes de ocupación para los parámetros ε'_a y ε'_b . El pseudocódigo del proceso llevado a cabo para obtener G se detalla en el Algoritmo 2.

4.2.1.1. Resultados en la segmentación de suelo y techo

La propuesta detallada en la sección anterior ha sido probada tanto en datos simulados como reales. La Figura 4.3 muestra un ejemplo de los resultados obtenidos bajo simulación. La Figura 4.3a ilustra una vista frontal de una nube de puntos simulada que correspondería a una habitación. Se pueden apreciar dos re-

Algoritmo 2 Obtención de la Función G

```

1: para cada  $\varepsilon \leftarrow \varepsilon_1$  a  $\varepsilon_2$  hacer
2:   para cada  $z \leftarrow z_a - \varepsilon/2$  a  $z_a + \varepsilon/2$  hacer
3:     calcular el centroide del plano de voxels del techo  $b$ 
4:     calcular el número de puntos en los intervalos  $a$  y  $b$ 
5:     calcular el porcentaje de puntos  $p_a$  y  $p_b$ 
6:   fin para
7:   para cada  $z \leftarrow z_b - \varepsilon/2$  a  $z_b + \varepsilon/2$  hacer
8:     calcular el centroide del plano de voxels del techo  $a$ 
9:     calcular el número de puntos en los intervalos  $a$  y  $b$ 
10:    calcular el porcentaje de puntos  $p_a$  y  $p_b$ 
11:  fin para
12: fin para
13: devolver  $G = \text{máx}(sum(p_a, p_b))$ 

```

giones con mayor densidad de puntos, las cuales corresponden al techo y al suelo y zonas con mayor dispersión que simulan el resto de puntos sensados en el interior. Los valores máximos de dos funciones gaussianas ajustadas a la distribución de puntos determinan los valores iniciales de $v_{z,a}$ y $v_{z,b}$. La Figura 4.3b muestra los planos de vóxeles proyectados sobre el plano YZ , los datos 3D y dos franjas en rojo y azul que contienen la mayoría de los puntos sensados. El plano de vóxeles rojos contiene los puntos del suelo y el de azules, los del techo. El algoritmo ha sido probado en 20 simulaciones y los porcentajes de ocupación medios para suelo y techo, en franjas calculadas, fueron de 96,9 % y 92,1 % respectivamente.

La Figura 4.4 presenta el resultado para un caso real. En la imagen se muestran los puntos 3D sensados por un láser desde cinco posiciones de un aula habitada. Los datos segmentados correspondientes al suelo y al techo están coloreados en rojo y cian. El número total de puntos en la nube es de 1.5 millones, de los cuales 187000 corresponden al techo y 95000 al suelo.

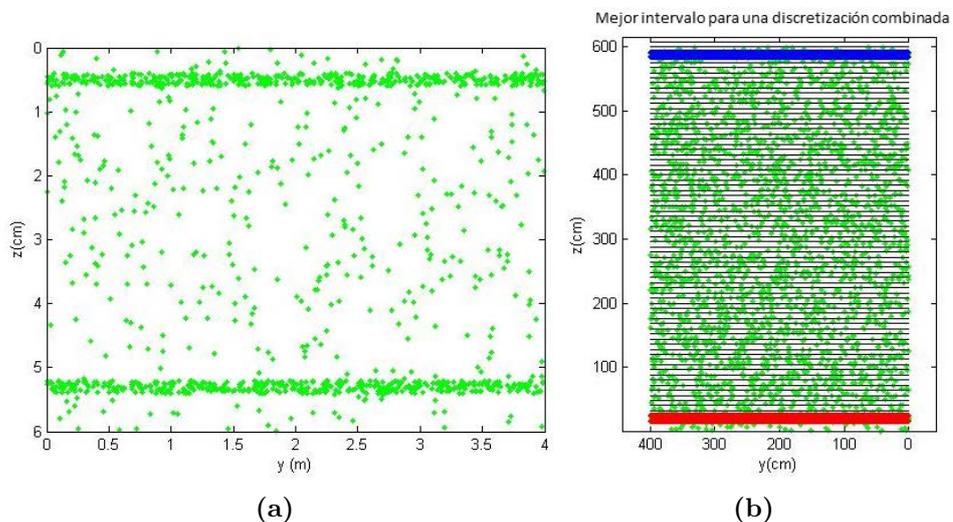


Figura 4.3: a) Datos simulados del interior de una habitación. Proyección en el plano YZ. b) Discretización final del espacio. Las franjas azul y roja contienen la mayoría de los puntos del suelo y el techo.

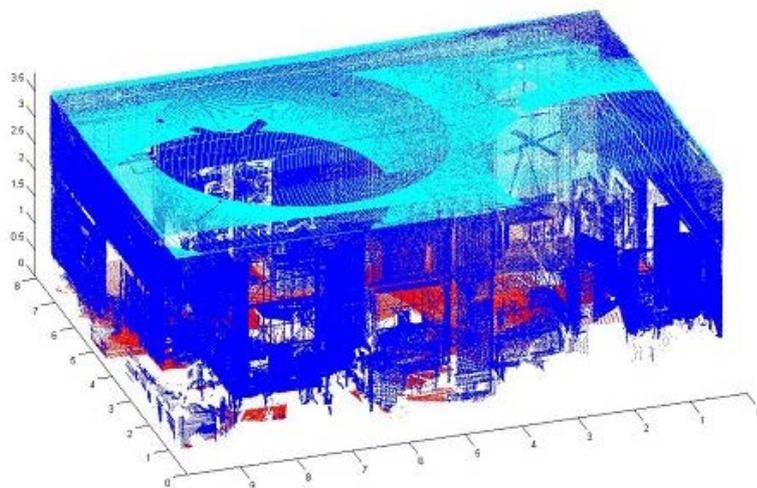


Figura 4.4: Segmentación real. Nube de puntos sensada en una habitación y puntos segmentados, correspondientes al techo (cian) y al suelo (rojo).

4.2.2. Segmentación de paredes

Después de identificar y segmentar los puntos 3D que definen el suelo y el techo, se realiza la detección de las paredes del escenario.

4.2.2.1. Habitaciones de planta rectangular

En esta sección se presenta el algoritmo que segmenta datos 3D procedentes de las paredes de una habitación de planta rectangular. En este caso, se puede aplicar la estrategia desarrollada en la Sección 4.2.1, considerando tres pares de planos de vóxeles paralelos, con lo cual la ecuación 4.2 puede ser fácilmente ampliada. El objetivo es encontrar seis paralelepípedos con centros c_i , $i = 1, \dots, 6$ y con una anchura común ε los cuales contengan el máximo número de puntos pertenecientes a los muros de la habitación. Formalmente, el objetivo es:

$$\arg \max_{\varepsilon, c_i} (G) \quad (4.3)$$

siendo $G(\varepsilon, c_1, c_2, \dots, c_6) = \sum_{i=1}^6 p_i(\varepsilon, c_i)$, $c_i \in [z_i - \frac{\varepsilon'_i}{2}, z_i + \frac{\varepsilon'_i}{2}]$, $i = 1, \dots, 6$, $\varepsilon \in [\varepsilon'_{\min}, \varepsilon'_{\max}]$

La Figura 4.5 muestra los segmentos de las cuatro paredes de un interior rectangular, presentado en la Figura 4.4

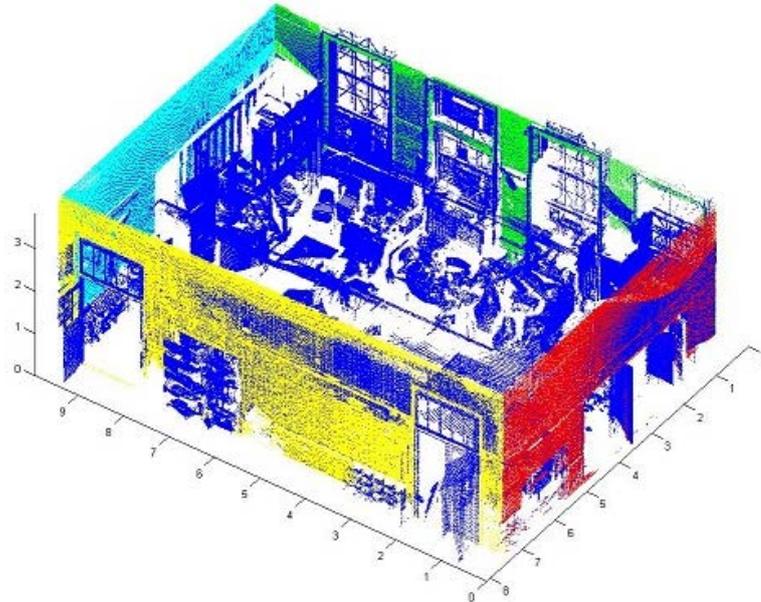


Figura 4.5: Segmentación de paredes en una habitación rectangular.

4.2.2.2. Habitaciones de planta arbitraria

Asumiendo que los planos del techo y el suelo son paralelos, la solución propuesta en la Sección 4.2.1 puede ser usada para detectar el suelo y el techo de cualquier habitación, con independencia de la forma de su planta. La Figura 4.6 ilustra la extracción de los puntos pertenecientes al suelo y al techo de una habitación con planta arbitraria. Sin embargo, la identificación de las paredes en interiores con este tipo de planta es una tarea mas compleja.

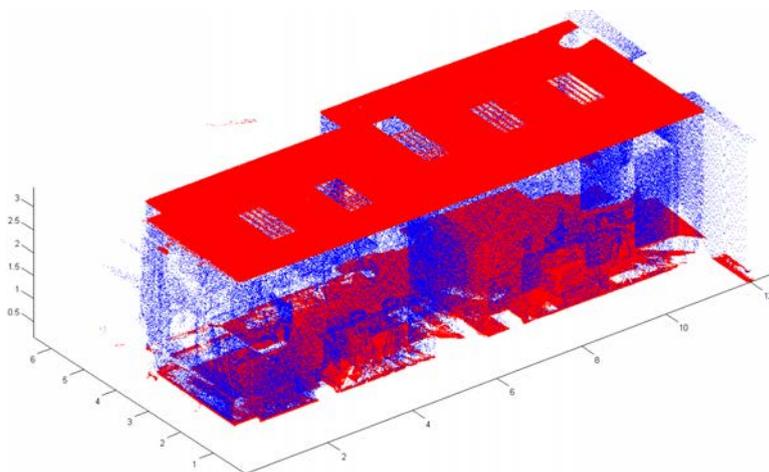


Figura 4.6: Segmentación de techo y suelo en una habitación de planta arbitraria.

La proyección de los datos 3D desde un punto de vista estratégico permite obtener una imagen binaria normalizada, en la cual cada píxel puede ser proyección de uno o varios puntos (píxeles blancos en la Figura 4.7b) o bien no ser proyección de ningún punto (píxeles negros en la Figura 4.7b). De aquí en adelante, se denotará I la imagen proyectada de los datos desde un punto de vista cenital. Esta imagen permite obtener una localización y posicionamiento aproximados de las paredes, los cuales serán refinados posteriormente. A continuación se detalla el proceso de segmentación.

Después de crear la imagen I , la frontera de la habitación es extraída y, a través de un algoritmo basado en la Transformada de Hough, el conjunto de aristas correspondiente a la proyección de las paredes es detectado en un contexto bidimensional.

Si una pared o la conexión entre dos paredes está completamente ocluida por mobiliario o elementos constructivos, la frontera de la habitación no se ajustará a la pared sino a dichos componentes. Una vez que las fronteras de la habitación se han identificado, los puntos fuera de estos límites son eliminados de forma automática.

Posteriormente, se calculan las intersecciones entre lados y se obtienen los vértices en la imagen. La Figura 4.7 muestra los pasos del proceso de segmentación: *a)* La nube de puntos es visualizada desde un punto de vista cenital; *b)* Discretización de la vista y generación de la imagen binaria I ; *c)* Extracción de fronteras en I ; *d)* Extracción de lados y vértices.

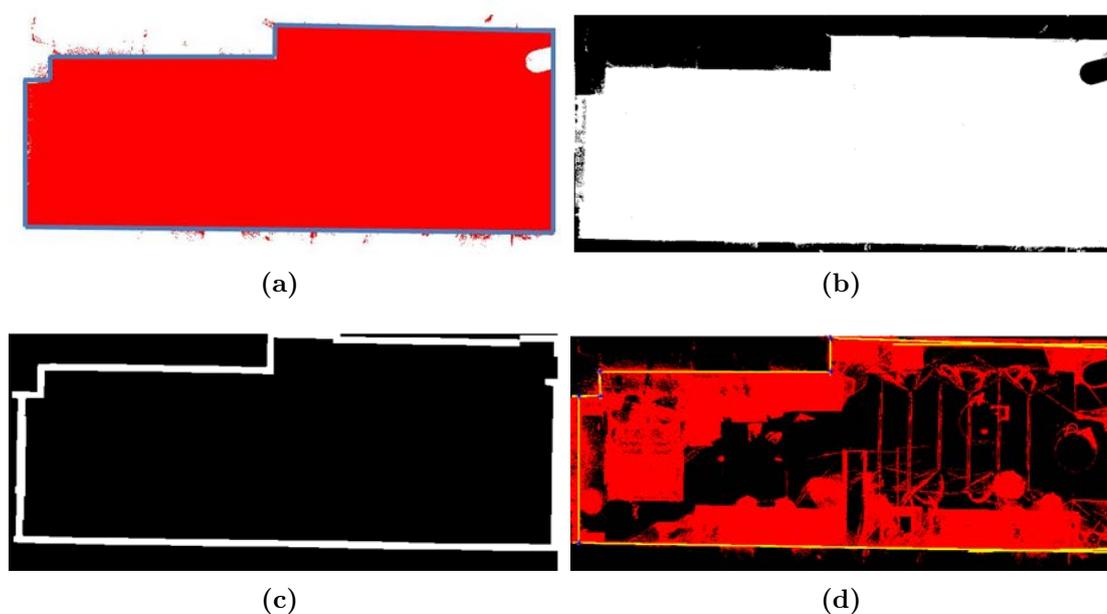


Figura 4.7: Procesos de la segmentación de paredes. *a)* Visualización de la nube de puntos desde un punto de vista cenital. *b)* Imagen binaria generada después de la discretización. *c)* Detección de la frontera. *d)* Definición de lados y vértices.

Asumiendo las paredes verticales, los lados y vértices en la imagen equivalen a planos y aristas en el contexto 3D. Dichos planos se emplean en la segmentación de los puntos 3D de cada pared como se muestra en la siguiente sección.

4.2.3. Creación de modelos B-Rep del contorno

El proceso de segmentación de los elementos estructurales proporciona el conjunto de puntos que pertenece a cada muro (incluyendo suelo y techo) de la escena interior. El siguiente paso consiste en convertir esta información en bruto en una representación de alto nivel. Del conjunto de modelos de representación 3D, se ha optado por el modelo de representación de fronteras (o *B-Rep*, del inglés *Boundary Representation*) (96). En *B-Rep*, una forma es descrita como un conjunto de elementos superficiales mediante información de conectividad, la cual describe la relación topológica entre elementos.

La generación del modelo *B-Rep* de un espacio interior comienza calculando los planos que mejor ajustan al conjunto de segmentos asociados a las paredes. Para conseguir este objetivo se emplea la técnica de Descomposición en Valores Singulares (SVD) (62). A través de SVD, la proximidad entre un plano y los puntos se calcula de forma sencilla. Los pasos para determinar la ecuación del plano que mejor ajusta a un conjunto de puntos genérico se muestra a continuación.

Cada nube de puntos $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, correspondiente a una pared, pueden ser ajustada a un plano definido por la ecuación

$$\Pi : Ax + By + Cz + D = 0 \quad (4.4)$$

El plano que mejor se ajusta al conjunto de puntos es aquel que minimiza la suma de las distancias entre cada punto p_i y el plano Π . Por tanto, se puede calcular cada plano minimizando la expresión

$$\sum_{i=1}^n \frac{|Ax_i + By_i + Cz_i + D|^2}{A^2 + B^2 + C^2} \quad (4.5)$$

Igualando a cero la derivada parcial de la ecuación 4.5 con respecto a D , se obtiene

$$D = -(Ax_0 + By_0 + Cz_0) \quad (4.6)$$

donde $p_0 = (x_0, y_0, z_0)$ es el centroide de P . Reemplazando 4.6 en 4.5:

$$\sum_{i=1}^n \frac{|A(x_i - x_0) + B(y_i - y_0) + C(z_i - z_0)|^2}{A^2 + B^2 + C^2} \quad (4.7)$$

Sea la matriz $M = [p_1 - p_0 \ p_2 - p_0 \ \dots \ p_n - p_0]^T$, donde $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ y $p_0 = (x_0, y_0, z_0)$; y el vector $v = [A \ B \ C]^T$. Se puede representar el problema en forma matricial como

$$\frac{(v^T M^T)(Mv)}{v^T v} \quad (4.8)$$

Esta expresión se denomina Cociente de Rayleigh y se minimiza para el autovector de $M^T M$, correspondiente al menor autovalor. A continuación, se emplea la descomposición singular de $M = USV^T$, donde las columnas de V son los vectores singulares de M y los autovectores de $M^T M$.

Por tanto, la solución de 4.5 proporciona la normal del plano Π , $\underline{n}_{\Pi} = [A \ B \ C]$. El parámetro D es calculado a partir de 4.6.

Una vez calculados los planos 3D que forman el recinto, se procede a calcular el error cometido al aproximar las paredes sensadas mediante planos. Para ello, se mide la distancia cuadrática de cada uno de los puntos a los planos calculados mediante la ecuación 4.9.

Sea un punto cualquiera $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ y $\Pi_j : A_j x + B_j y + C_j z + D_j = 0$ un plano cualquiera. La menor distancia, o distancia cuadrática entre p_i y Π_j es:

$$D_{i,j} = \frac{|A_j x_i + B_j y_i + C_j z_i + D_j|}{\sqrt{A_j^2 + B_j^2 + C_j^2}} \quad (4.9)$$

siendo $i = 1, 2, \dots, n$ el número de puntos evaluados en el entorno de las paredes y $j = 1, 2, \dots, m$ el número de paredes (planos) que forman la habitación.

Si $i = r$, para el punto p_r existe una distancia mínima $\min(D_{r,j})$ cuyo valor j indica la pared más próxima.

El último proceso consiste en calcular las intersecciones entre planos conectados. Nótese que la relación topológica entre los muros se ha establecido en el apartado 4.2.2.2. Por tanto, conocemos qué planos intersecan con qué otros y es posible calcular las aristas 3D y las esquinas de la habitación. Por otro lado, los planos de suelo y techo intersecan con los planos de todas las paredes y definen las aristas que determinan el suelo y el techo de la habitación. Los vértices, en este caso, pueden extraerse a partir de la intersección entre tres planos.

A modo de ejemplo, la Figura 4.8 muestra la segmentación de puntos en diferentes paredes para dos habitaciones bajo estudio.

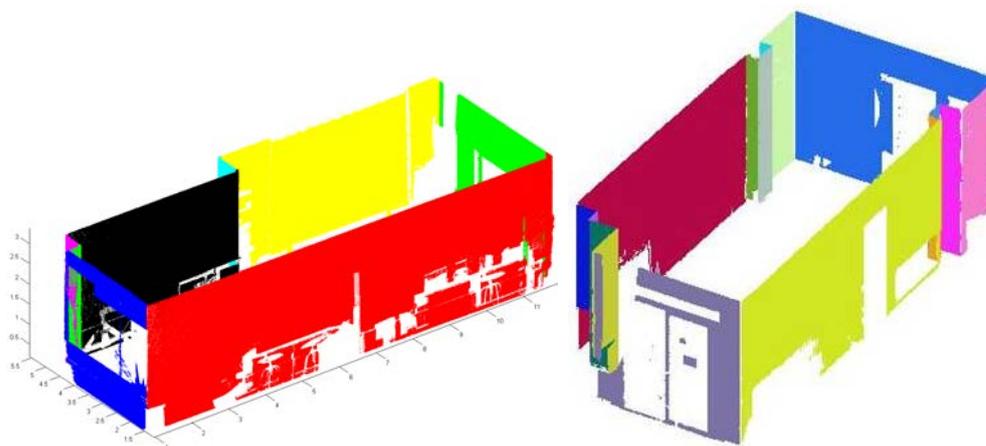


Figura 4.8: Segmentación de datos correspondientes a las paredes.

La Figura 4.9 muestra el resultado obtenido mediante esta propuesta para un interior bajo estudio. En 4.9a se representan los planos ajustados a cada pared y la Figura 4.9b muestra los vértices etiquetados de la habitación. La Figura 4.9c contiene el gráfico de relaciones topológicas, en el cual las caras adyacentes comparten una arista en el diagrama.

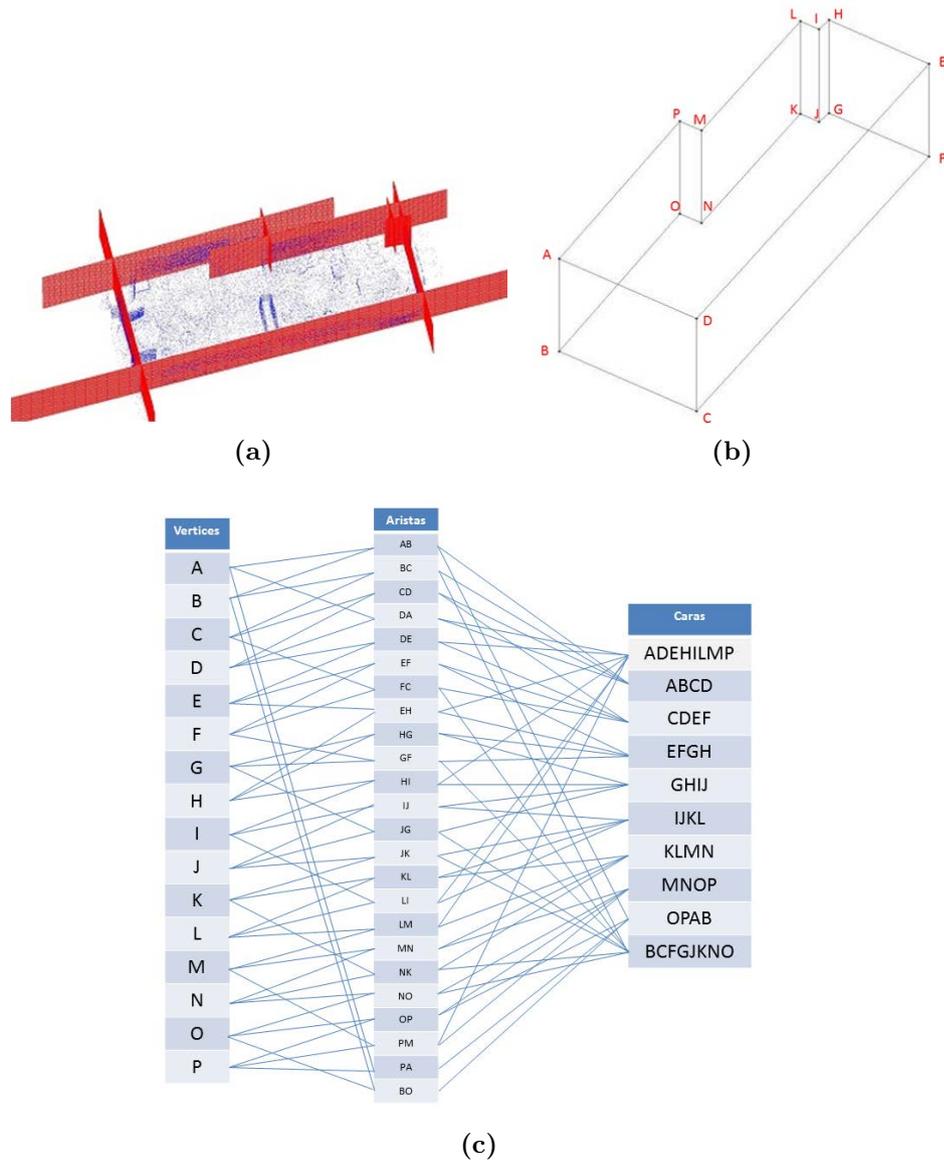


Figura 4.9: a) Planos ajustando las paredes. Nótese que los planos (en rojo) no representan las paredes, sino los planos. Simplemente se usan para ilustrar las intersecciones entre planos. b) Vértices etiquetados de una habitación. c) Relación topológica entre los elementos en la habitación mostrada en a) y b).

4.3. Determinación de huecos enmarcados en estructuras de contorno

Tras segmentar los muros y generar el modelo *B-Rep* del contorno, se procede a determinar los huecos enmarcados (con marco) en estructuras de contorno.

Si se analizan los puntos correspondientes a cada una de las paredes, se pueden visualizar zonas vacías. Estas áreas sin información pueden aparecer por: la existencia de elementos constructivos como puertas y ventanas, oclusiones generadas por determinados elementos presentes en el escenario o la falta de datos en la región.

Primero, se analiza cada conjunto de datos de cada una de las paredes segmentadas en procesos anteriores. Con el objetivo de simplificar el algoritmo de identificación de huecos, se trasladan los puntos 3D al origen de coordenadas, como se muestra en la Figura 4.10.

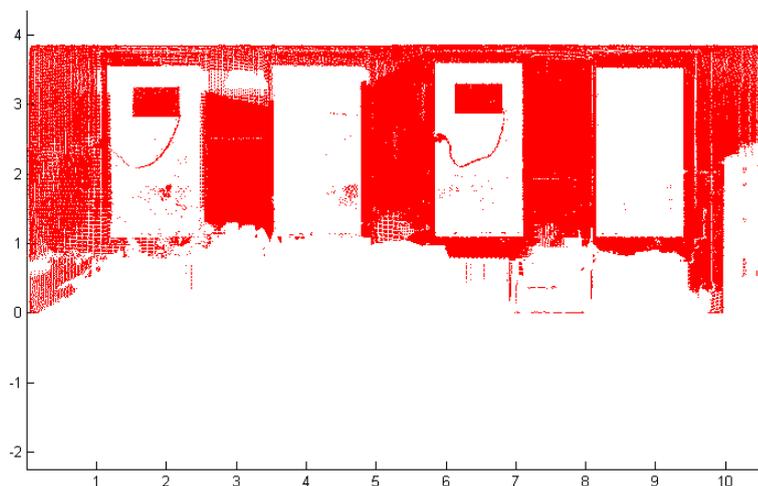


Figura 4.10: Datos 3D correspondientes a una pared sensada.

El procedimiento de determinación de huecos correspondientes a puertas y ventanas se basa en encontrar las regiones de moldura que enmarcan los vanos.

4.3.1. Etapas a seguir

4.3.1.1. Transformación de puntos 3D a una imagen binaria I_0

Para determinar las zonas de la pared que no contienen información, se discretiza el espacio mediante una malla cuadrada cuyo tamaño viene determinado por la resolución de trabajo del escáner (r_e). Como muestra la Figura 4.11a, en la que se representa la proyección de los puntos de la pared, los cuadros de la malla pueden contener puntos o no, dando lugar a zonas ocupadas o vacías.

La totalidad de cuadros vacíos (en verde en la Figura 4.11b) dan lugar al conjunto de estudio, cuyo entorno debe evaluarse con el fin de detectar molduras y definir los huecos correspondientes a ventanas y puertas.

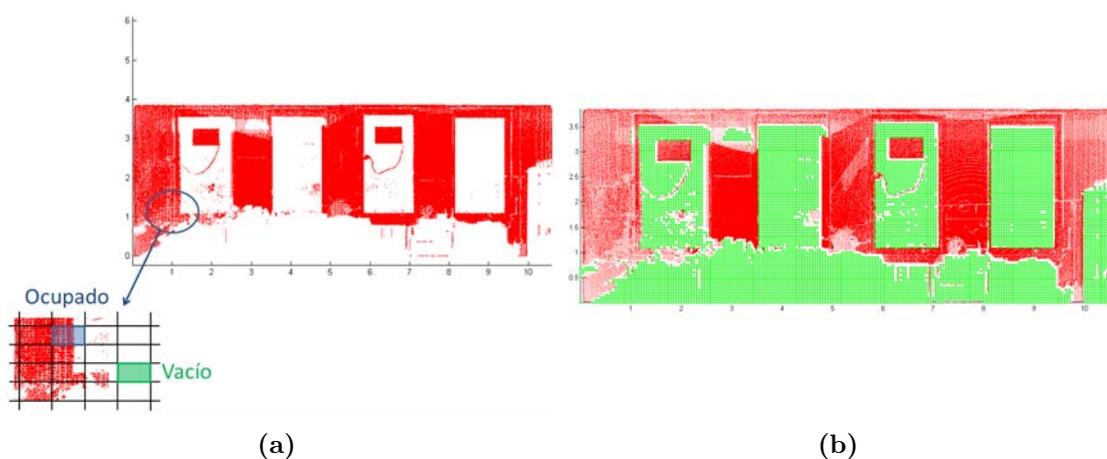


Figura 4.11: a) Identificación de zonas vacías en la pared. b) Representación discretizada de zonas vacías en la pared (en verde) y proyección de puntos 3D de la pared (en rojo).

Esta representación de las zonas vacías (Figura 4.12a) se transforma en una imagen bidimensional binaria (I_0) mediante un reescalado (ver Figura 4.12b) y posteriormente, se determinan los contornos en la imagen (Figura 4.12c). Un contorno se corresponde con una cadena cerrada o no cerrada de píxeles.

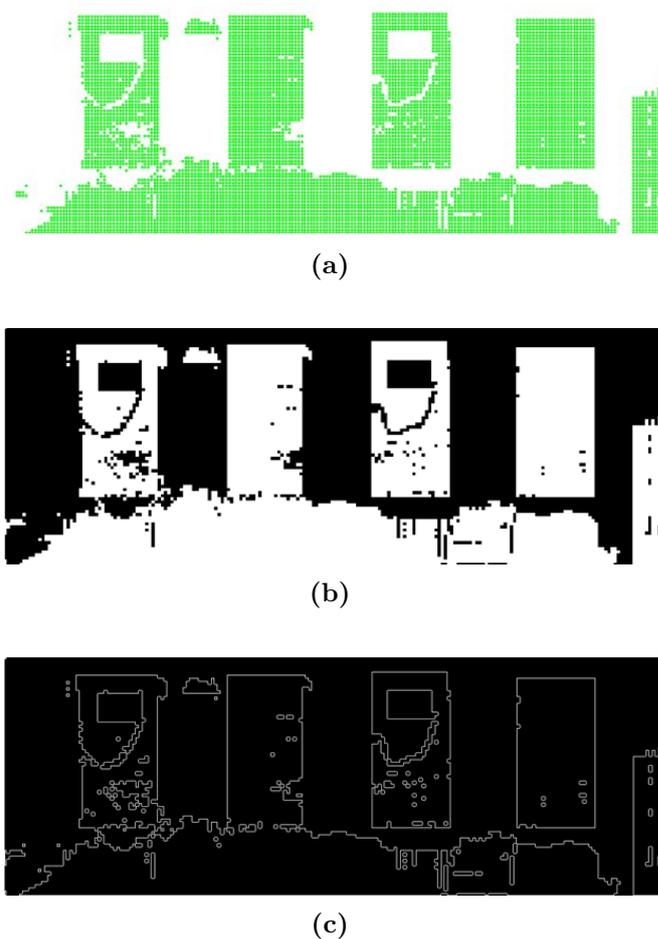


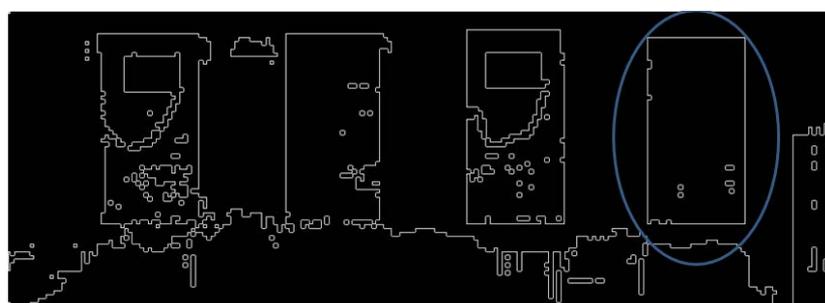
Figura 4.12: Binarización de la imagen de zonas vacías de la pared y determinación de contornos de la imagen.

4.3.1.2. Determinación de segmentos mínimos de molduras en I_0

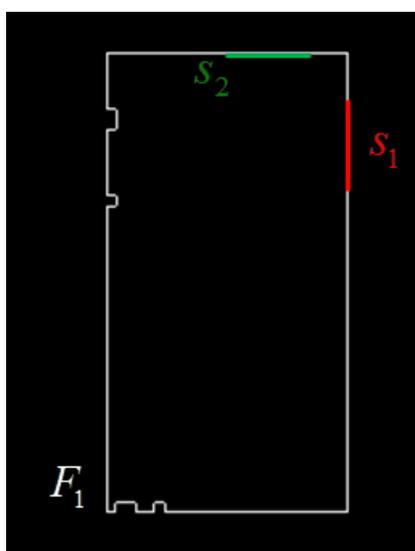
La siguiente etapa del proceso de determinación de huecos enmarcados consiste en establecer un conjunto de segmentos mínimos que contengan parte de las molduras que rodean dichos huecos. Estos segmentos mínimos son conjuntos de puntos 3D del entorno de los huecos y se obtienen como se muestra a continuación:

- Se selecciona uno de los contornos identificados en el proceso anterior (rodeado en azul en la Figura 4.13a).

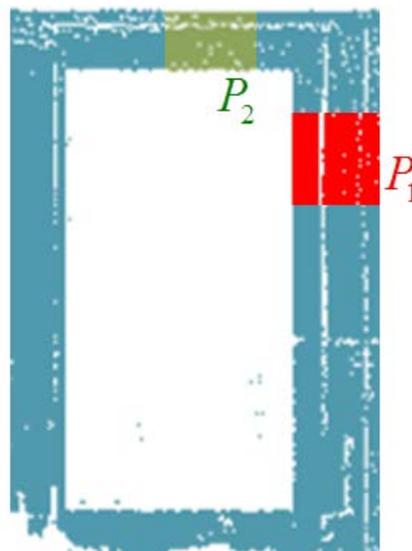
- El contorno se fragmenta en segmentos verticales y horizontales de longitud menor que una longitud dada. En cada fragmento se debe mantener la coordenada X o Y de la imagen. Un ejemplo puede apreciarse en la Figura 4.13b, donde se denotan como S_n .
- Para cada fragmento, se recuperan los datos 3D de su entorno. Cada uno de estos grupos de puntos 3D (P_n) es lo que se llama un segmento mínimo (ver Figura 4.13c).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.13: a) Contorno seleccionado del conjunto total de cadenas. b) Conjuntos de píxeles consecutivos (vertical y horizontal). c) Ejemplos de segmentos mínimos recuperados.

Posteriormente, cada segmento mínimo se proyecta en el plano perpendicular a su eje axial con objeto de delimitar con precisión el área de la moldura.

A continuación, se realiza un proceso de filtro paso bajo que elimina puntos espurios. Para ello, se discretiza la imagen proyectada con una malla de 1 cm de lado. Se definen como zonas compactas aquéllas que cumplen:

$$d > \frac{1}{r_e} \quad (4.10)$$

siendo $d = \frac{np_c}{l_s}$, con np_c el número de puntos en cada cuadro y l_s la longitud del subconjunto (ver Figura 4.14a). Las zonas no compactas son eliminadas de los segmentos mínimos.

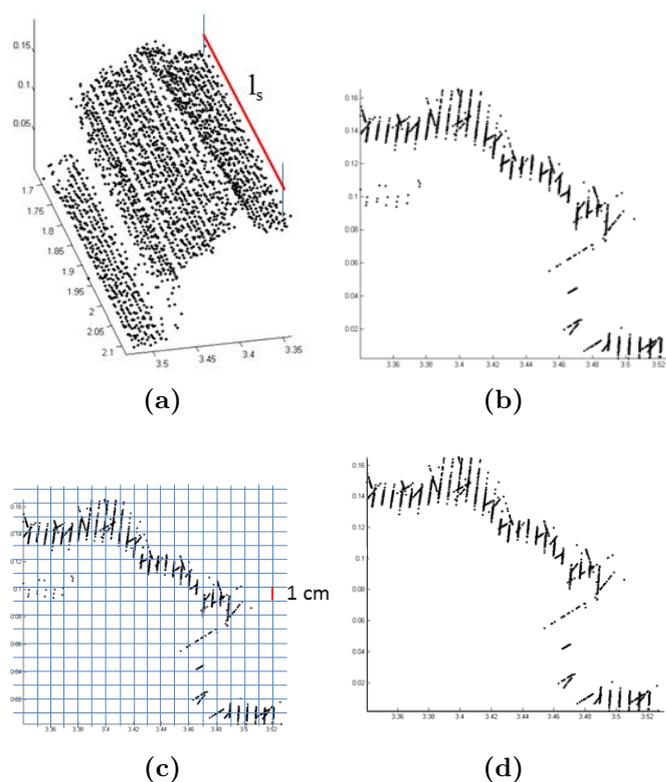


Figura 4.14: a) Segmento mínimo candidato a molde. b) Proyección del segmento mínimo. c). Discretización de la proyección para la identificación de zonas compactas. d) Proyección de las zonas compactas de un segmento mínimo.

Probablemente, estos puntos espurios pertenecen a algún objeto que ocluye la moldura o bien son valores erróneos proporcionados por el escáner. La Figura 4.14 ilustra el procedimiento de filtrado.

Una vez establecidas las zonas compactas de cada segmento mínimo, debe estudiarse si éste se encuentra en el entorno de un vano (hueco generado por la instalación de una puerta o una ventana) o si, por el contrario, el segmento está en el entorno de un hueco producido por oclusiones o falta de datos en el área.

Para ello, y como se incidirá en el apartado 4.3.2.2, se propone caracterizar la proyección de cada segmento mínimo mediante una función f_p , que identificará de forma unívoca (en su caso) a una moldura. Esta función se denomina “perfil de la moldura” y se obtiene ajustando los datos del segmento mínimo a una función.

A través del grado de uniformidad de f_p se determina si el segmento mínimo es parte o no de una moldura. Para ello, se estudia el grado de ajuste de f_p a una función uniforme centrada en su valor medio.

En la Figura 4.15 se muestran dos ejemplos de perfiles distintos.

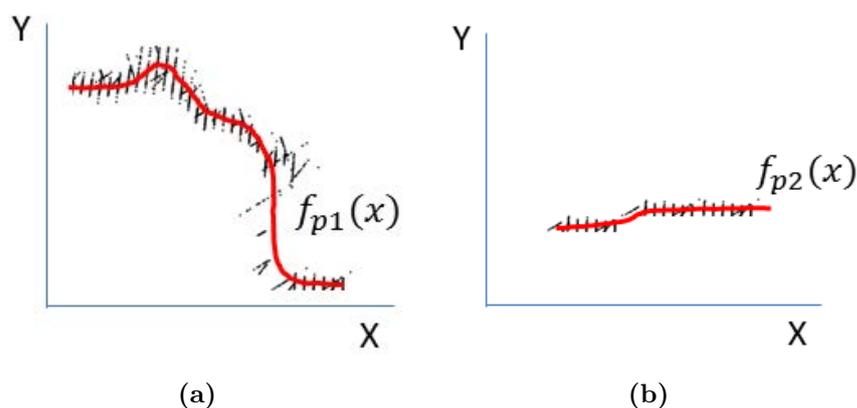


Figura 4.15: a) Perfil considerado parte de una moldura. b) Perfil que no cumple la condición de moldura.

4.3.1.3. Agrupamiento de segmentos mínimos de molduras en la misma dirección

El siguiente paso consiste en estudiar la posición de los segmentos mínimos seleccionados en el proceso anterior. Mediante este proceso, se busca determinar si diferentes candidatos pertenecen a un conjunto de molduras que encierra el mismo hueco. Debido a oclusiones causadas por elementos de la escena, determinadas molduras pueden haber sido sensadas de manera fragmentada.

Para afirmar que diferentes segmentos mínimos pertenecen a la misma moldura, estos deben cumplir tres condiciones:

1. Estar alineados en la misma vertical u horizontal. Se calculan los centroides de cada uno de los segmentos, ya sean sus ejes longitudinales horizontales (en verde) o verticales (en azul). Ver la Figura 4.16a.
2. Estar próximos entre sí. Para ello, la distancia entre segmentos debe ser inferior a un umbral (en este caso 0.4 m).
3. Tener el mismo perfil. Se comparan los perfiles. Si ambos ocupan la misma región discretizada, se considera que los dos segmentos encierran el mismo hueco y, por tanto, forman parte de la misma moldura.

Una vez agrupados los segmentos mínimos que forman parte de la misma moldura, se filtran molduras menores de 40 centímetros.

4.3.1.4. Determinación de regiones enmarcadas

Al inicio de este apartado, se cuenta con un conjunto de segmentos horizontales y verticales que cumplen las condiciones para enmarcar una región vacía. Una representación simplificada de los segmentos se ilustra a continuación en la Figura 4.17, donde los segmentos horizontales son representados en azul y los verticales en rojo.

Generalmente, los elementos estructurales a identificar (huecos de puertas y ventanas) tienen forma rectangular y sus aristas son paralelas y perpendiculares

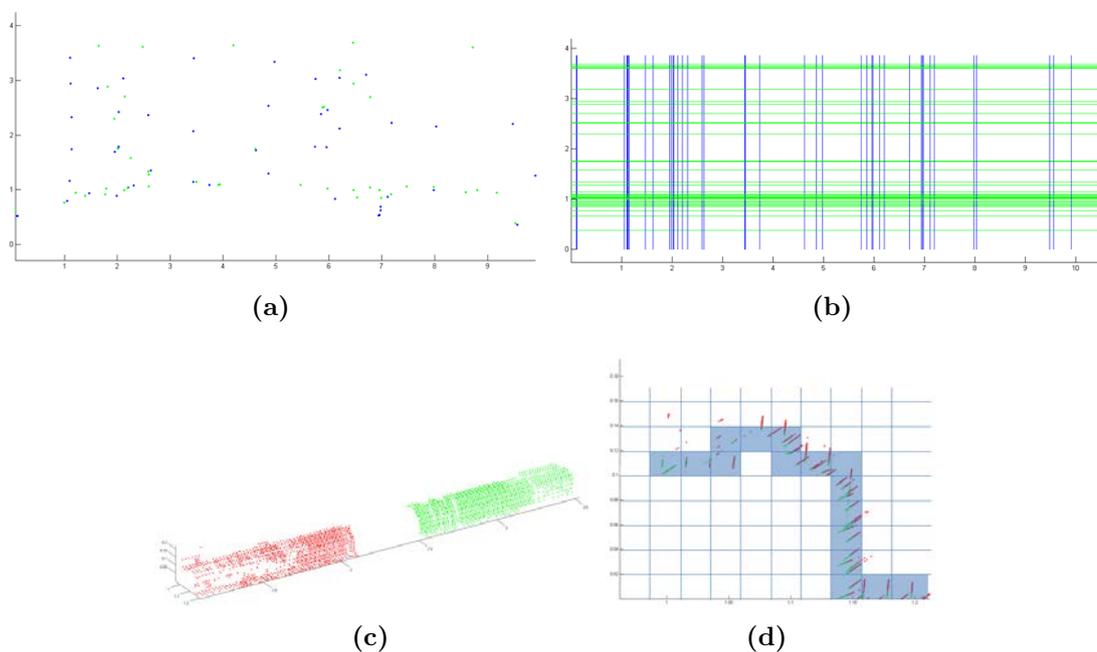


Figura 4.16: a) Centroides de los candidatos a molde. b) Líneas en las que se encuentran los candidatos. c) Segmentos mínimos. d) Ubicación de los perfiles en la región discretizada

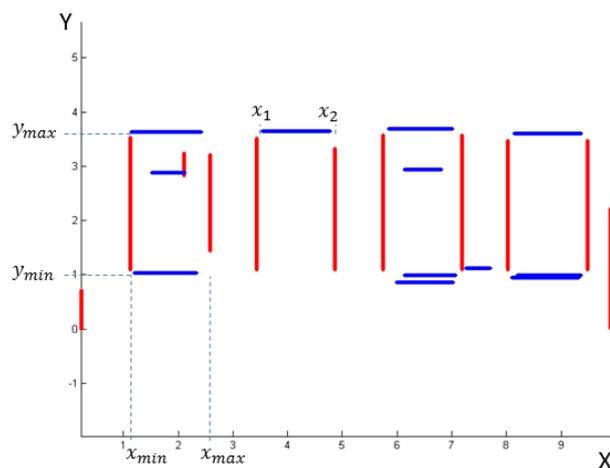


Figura 4.17: Representación de los segmentos determinados en el proceso anterior.

al plano del suelo. Por tanto, bajo esta hipótesis, la siguiente tarea consiste en identificar grupos de segmentos que cumplan estas características geométricas y que definan las regiones de búsqueda.

Para determinar estas regiones de búsqueda, se toman como referencia los segmentos horizontales. Esta decisión se basa en que el segmento horizontal superior es, previsiblemente, el que sufre una menor oclusión.

En primer lugar se agrupan los segmentos horizontales que están solapados en la dimensión X . Cada uno de los segmentos horizontales se define a partir de unas coordenadas (x_1, x_2) que lo delimitan en el eje X y una coordenada en el eje Y . Por tanto, distintos segmentos horizontales vinculados a una misma agrupación pueden definir un entorno (x_{min}, x_{max}) , el cual define la amplitud del hueco en el eje X . A su vez, para el rango (x_{min}, x_{max}) , la región de búsqueda está delimitada en el eje Y por las coordenadas (y_{max}, y_{min}) (Figura 4.17).

Si en un entorno delimitado (x_{min}, x_{max}) solo existe un segmento horizontal, se añade un segmento adicional a la altura del suelo (en verde en la Figura 4.18b) y se amplía la región de búsqueda.

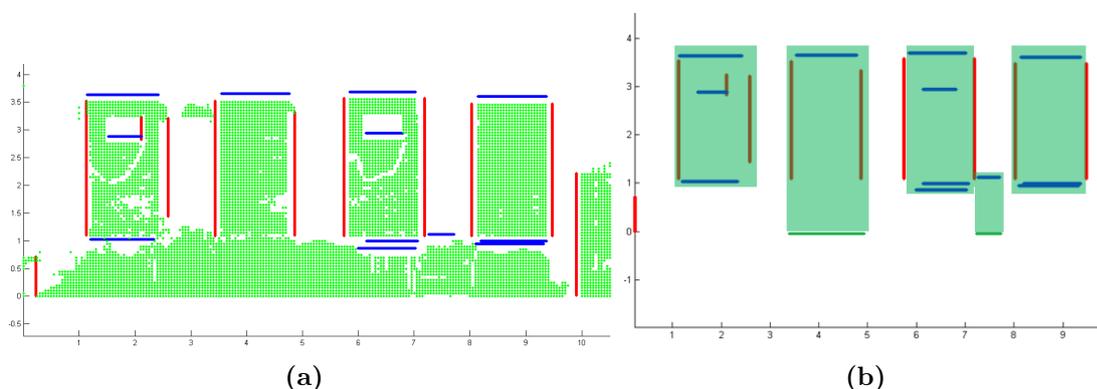


Figura 4.18: a) Segmentos y píxeles vacíos del entorno de la pared. b) Regiones de búsqueda determinadas.

Como se ilustra en la Figura 4.19, sobre la región de búsqueda se aplica un algoritmo de crecimiento por semilla, siendo la semilla un píxel vacío en dicha región. A través de este algoritmo se logra determinar el contorno del hueco.

La Figura 4.20 muestra los diferentes huecos detectados para una pared sensada. Tres de ellos se corresponden con huecos de tipo ventana (en rojo) y el cuarto con un hueco tipo puerta (en azul).

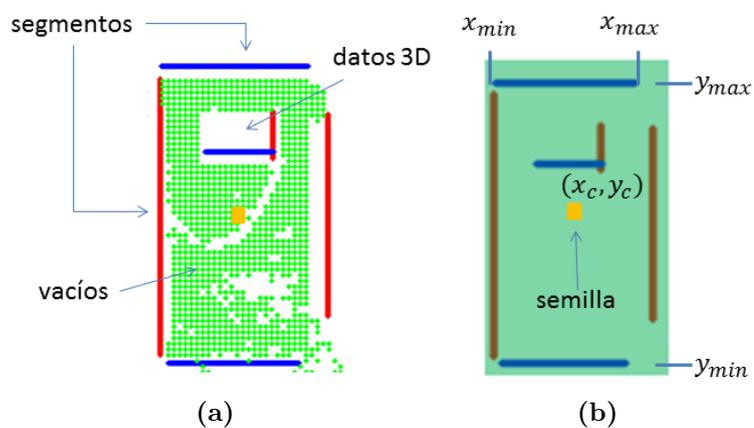


Figura 4.19: Región que engloba un hueco. a) Segmentos y píxeles vacíos. b) Semilla y límites de búsqueda.

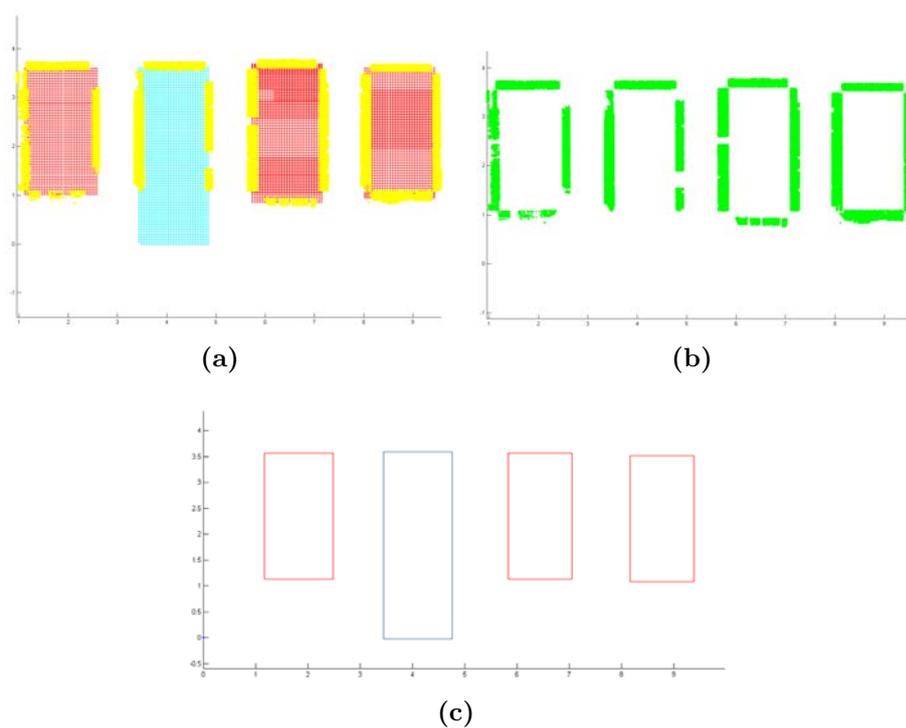


Figura 4.20: a) Huecos detectados en una pared bajo estudio. b) Datos 3D pertenecientes a los marcos que rodean los huecos. c) Polígonos que definen los huecos enmarcados.

4.3.2. Identificación del tipo de molduras en el entorno de elementos estructurales huecos

Como se menciona en secciones anteriores, existen determinados elementos que aunque no sean parte de una pared, se encuentran adheridos a ella. Se trata de los marcos de puertas y ventanas.

Partiendo de los datos segmentados en el entorno de los huecos presentes en elementos estructurales, como los que se muestran en la Figura 4.20b, se procede a identificar el tipo de moldura al que se ajustan dichos datos.

Para realizar esta tarea, se divide el trabajo en dos partes bien diferenciadas: la primera de ellas consistente en el estudio del alineamiento del molde a lo largo de su eje longitudinal, y la segunda está destinada a caracterizar el perfil del molde a través de un descriptor. Una vez realizadas estas dos operaciones, se procede a comparar el perfil obtenido con diferentes modelos almacenados en una base de datos y clasificar finalmente la moldura.

4.3.2.1. Determinación del eje del molde

Al trabajar en la detección de huecos de puertas o ventanas en nubes de puntos, se puede comprobar que, en la mayoría de los casos, los lados que conforman dicho elemento son paralelos dos a dos y a su vez paralelos o perpendiculares al plano del suelo. Esto es, las puertas o las ventanas suelen ser rectangulares y el eje de sus marcos horizontal o vertical. Sin embargo, puede darse el caso que, bien por no tratarse de una puerta o una ventana de las que denominamos *estándar* (de forma rectangular), bien por problemas en la colocación del escáner, los moldes no son exactamente verticales u horizontales.

Por tanto, se necesita estudiar el alineamiento de los diferentes moldes detectados en la escena según un eje determinado. En la parte superior de la Figura 4.21 se muestran diversos alineamientos del eje de un molde. Mientras que a la izquierda el perfil del molde está correctamente alineado con la vertical, a la derecha se aprecia una inclinación α respecto de la vertical.

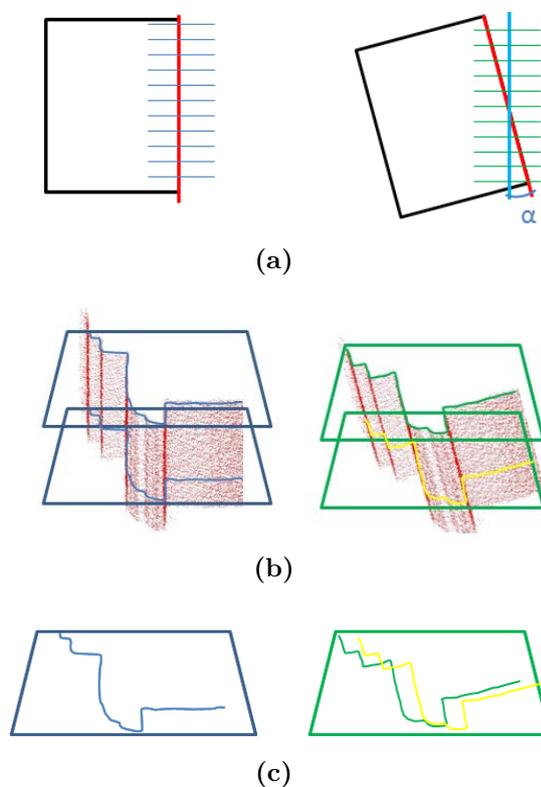


Figura 4.21: a) Ejemplo de perfiles de una ventana alineados (izquierda) y desalineados (derecha) con la vertical. b) Nube de puntos contenidos en una pequeña capa horizontal. c) Perfiles del molde en los planos que delimitan la capa.

Para estudiar el citado alineamiento, en primer lugar se define la región de interés (*ROI*, del inglés *Region of Interest*), que no son más que las regiones que ocupan los datos 3D de los marcos determinados en la sección anterior. En este caso, se trata de una de las paredes de un interior bajo estudio, del cual se han extraído los datos del entorno de una moldura. La Figura 4.22 muestra un ejemplo de pared donde se visualizan los puntos recogidos por el sensor y donde la región de interés es marcada. Los diferentes colores corresponden a diferentes planos de voxels incluido el plano de la pared en rojo.

A continuación, se divide la región de interés en varias capas o franjas (ver Figura 4.23) perpendiculares al eje longitudinal del marco de la puerta o la ventana. Estudiando los datos contenidos en estas capas se determina el alineamiento del marco.

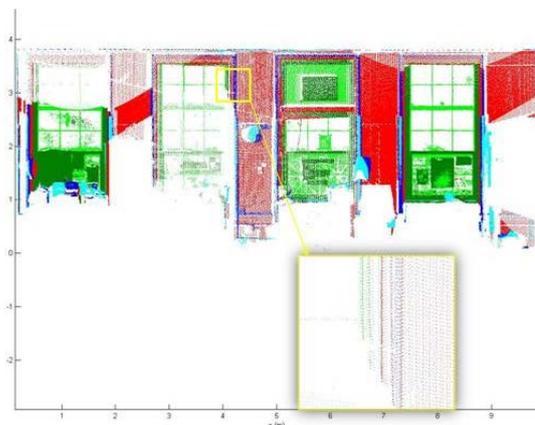


Figura 4.22: Pared bajo estudio donde se muestra la ROI ampliada.

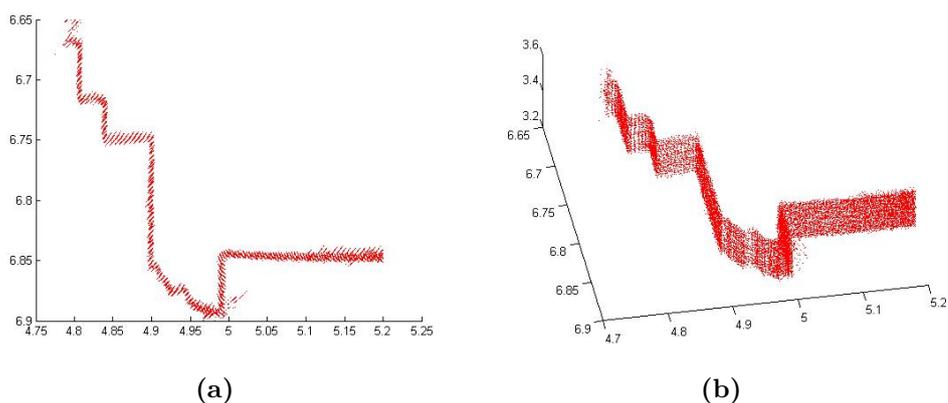


Figura 4.23: Distintas perspectivas del plano correspondiente al marco de una ventana.

Para cada capa se genera un histograma bidimensional de la densidad de puntos, desde un punto de vista cenital. Este histograma puede ser interpretado como una imagen donde el nivel de gris de un píxel recoge el número de puntos que se proyectan en el área real delimitada por el píxel. De esta manera, se trabaja estableciendo relaciones entre imágenes correspondientes a las capas en las que se divide el área de interés.

Con el fin de estudiar la información común entre distintas imágenes, se calcula la correlación existente entre parejas de histogramas 2D donde, como se ha dicho, cada píxel indica, en niveles de gris, la densidad de puntos en esa área (ver Figura

4.24). Obtenidos los histogramas de las diferentes capas, se lleva a cabo un proceso de comparación mediante correlación.

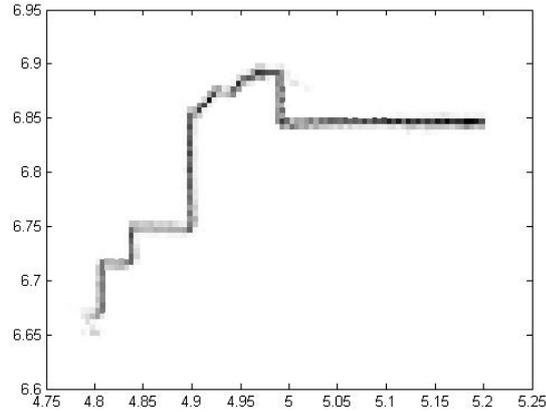


Figura 4.24: Histograma 2D correspondiente a una capa en la ROI.

Para dos imágenes generadas en dos capas, el coeficiente de correlación cruzada está definido por:

$$\rho(g_1, g_2) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (g_1(x_i, y_j) - \bar{g}_1)(g_2(x_i, y_j) - \bar{g}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (g_1(x_i, y_j) - \bar{g}_1)^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (g_2(x_i, y_j) - \bar{g}_2)^2}} \quad (4.11)$$

siendo

$$\bar{g}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_1(x_i, y_j)}{nm} \quad \bar{g}_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_2(x_i, y_j)}{nm}$$

En el proceso de alineamiento se toman dos imágenes de capas contiguas y se determina la translación $(\delta x, \delta y)$ según la cual la correlación es máxima. Suponiendo k capas de la región de interés, se obtienen k puntos correspondientes $(\delta x, \delta y)_i$, $i = 1, 2, \dots, k$. El eje del molde es finalmente obtenido ajustando todos los puntos correspondientes a una recta, como muestra la Figura 4.25.

La Figura 4.26 ilustra el procedimiento seguido. Se muestran diferentes casos de translación para encontrar la máxima correlación entre capas de datos. En *a*), se realiza una translación en el eje Y sobre la capa roja; en *b*), la translación se realiza en el eje X y en *c*), se traslada la capa en el plano XY . En *a*), se muestra en detalle la imagen que se correlacionaría con la primera capa.

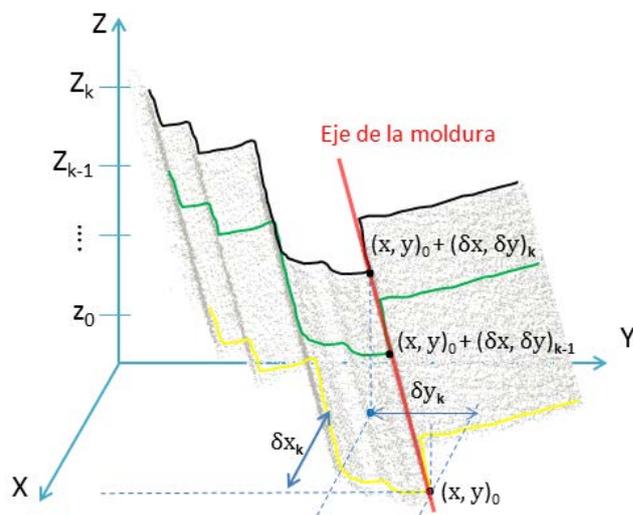


Figura 4.25: Estudio de la máxima correlación para obtener el eje de la moldura.

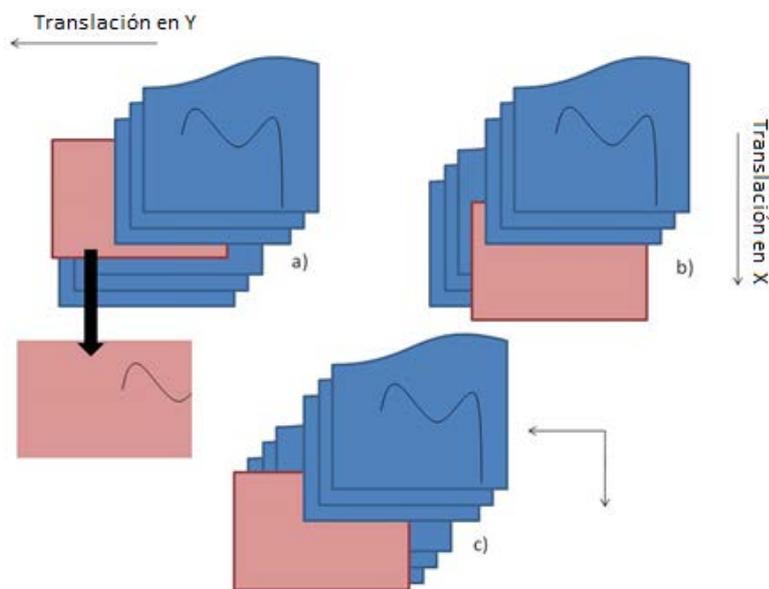


Figura 4.26: Desplazamiento de una capa para diferentes estudios de correlación.

4.3.2.2. Segmentación del molde

Imagen del perfil del molde

Como se menciona anteriormente, el perfil de una moldura se identifica mediante

un descriptor, que lo etiqueta y facilita su indexación y búsqueda. Este descriptor es definido sobre una imagen bidimensional obtenida a través del histograma inicial referido en la sección anterior. En esta sección se detalla la obtención de la imagen del perfil.

El histograma 2D correspondiente a una capa del molde es reconvertido a un histograma ponderado en el que la proyección de un punto repercute en los cuatro píxeles adyacentes de la imagen. De este modo, se suaviza la imagen que representa el perfil. Se recuerda que un píxel de la imagen representa a un pequeño cuadrado de lado L en el espacio (ver Figura 4.27). La influencia de cada punto 3D sobre la frecuencia asignada a un píxel es inversamente proporcional a la distancia del punto al centro del rectángulo representado por el píxel. La obtención del histograma ponderado es como sigue:

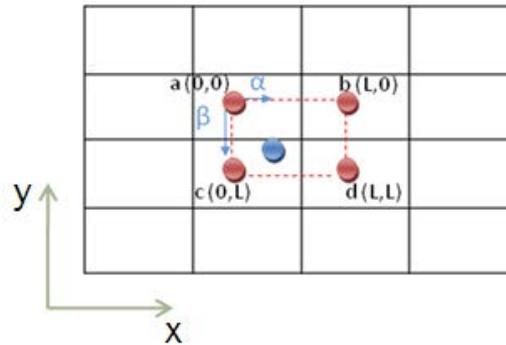


Figura 4.27: Esquema del proceso de interpolación.

Sean a, b, c, d los centroides de los cuadrados del mallado que rodean a un punto p . Considerando α la distancia en el eje X desde el segmento ac , que une los puntos a y c , hasta el punto p y β la distancia en el eje Y desde el segmento ab hasta el punto p , podemos decir que el punto contribuye con los siguientes pesos a cada centroide:

$$A = \frac{(L-\alpha)(L-\beta)}{L^2} \quad B = \frac{\alpha(L-\beta)}{L^2} \quad C = \frac{(L-\alpha)\beta}{L^2} \quad D = \frac{\alpha\beta}{L^2}$$

Obtenido el histograma 2D ponderado se genera una imagen I donde se puede realizar un procesamiento de imagen. A continuación, se realiza una transformada

de Hough para determinar los segmentos en la imagen y se obtiene una función a trozos $f(x)$ que representa el perfil del molde.

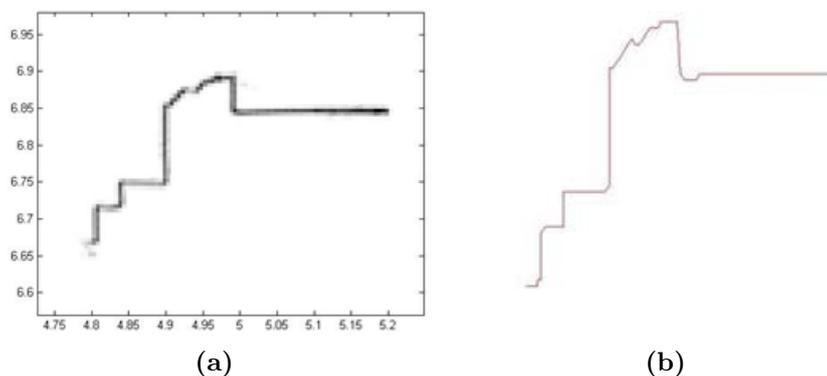


Figura 4.28: a) Histograma 2D ponderado. b) Imagen I y obtención de la línea del perfil $f(x)$.

La Figura 4.28a muestra el resultado del histograma ponderado sobre el perfil de la Figura 4.24 mientras que la Figura 4.28b presenta la función $f(x)$ obtenida.

Separación de la región correspondiente a la pared

El objetivo ahora es separar, sobre la imagen del perfil I , las partes correspondientes a la pared y a la moldura. Empleando las líneas rectas detectadas en la imagen correspondiente al perfil del marco, se determina la función escalón $h(x)$ que mejor ajuste con la función $f(x)$, como muestra la Figura 4.29. Formalmente:

$$h[x] = \begin{cases} y_{wall} & x \in (a, b) \\ 0 & resto \end{cases} \quad (4.12)$$

Siendo $a = \underset{x}{\text{mín}}(\Omega)$ $b = \underset{x}{\text{máx}}(\Omega)$ y $\Omega = \{p = (x, y) | y \leq y_{wall}\}$

A través de las funciones $f(x)$ y $h(x)$, se obtienen las regiones que corresponden a la moldura en la imagen I . Se genera así una imagen binaria S en la que quedan identificados los puntos de la moldura (ver Figura 4.30). La expresión de S es la siguiente

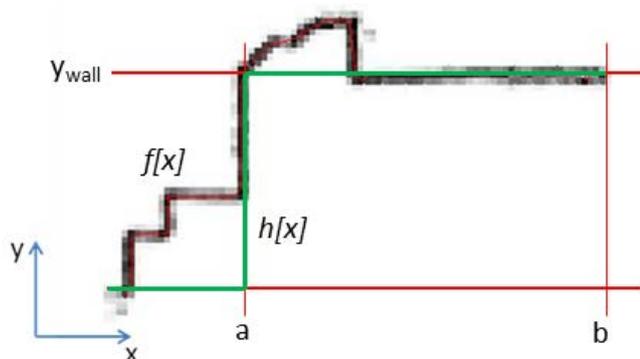


Figura 4.29: Definición de la función $h(x)$.

$$S(x, y) = \begin{cases} 1 & h(x) \leq y \leq f(x) \\ 0 & \text{resto} \end{cases} \quad (4.13)$$

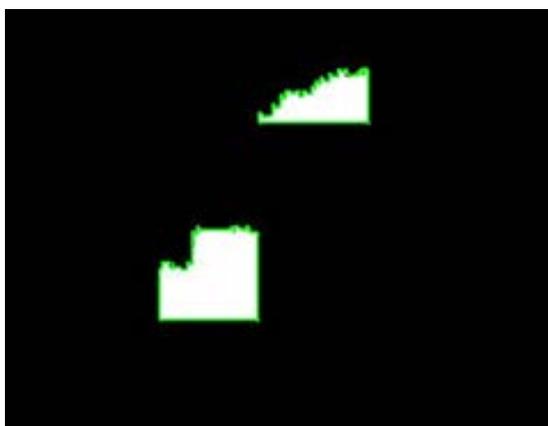


Figura 4.30: Ejemplo de imagen S con las regiones de moldes segmentadas.

Descriptor del molde

Una vez segmentadas las regiones del molde, el último proceso a realizar consiste en comparar los perfiles obtenidos en el apartado anterior en una base de datos. De esta manera, se identifican los moldes presentes en el escenario y además, se pueden completar marcos incompletos debido a falta de información en el proceso de escaneado.

A partir de la imagen S se define un descriptor sobre cada una de las regiones segmentadas. En este trabajo, el descriptor escogido es una firma normalizada del contorno de dichas regiones.

Para establecer un punto de referencia en cada moldura, con el fin de facilitar las comparaciones con otros moldes, se calcula el centroide del perfil usando la ecuación 4.14.

$$(x, y)_c = \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right) \quad (4.14)$$

siendo n el número de puntos del contorno.

Los parámetros que definen el descriptor del perfil, la distancia d y el ángulo θ respecto del centroide, se calculan con las siguientes expresiones:

$$d = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} \quad (4.15)$$

siendo (x, y) las coordenadas de cada punto del perfil en la imagen y (x_c, y_c) las coordenadas del centroide.

$$\theta(x, y) = \begin{cases} \frac{\pi}{2} & \text{si } \Delta x = 0 \text{ y } \Delta y \geq 0 \\ \frac{3\pi}{2} & \text{si } \Delta x = 0 \text{ y } \Delta y < 0 \\ \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) + \pi & \text{si } \Delta x < 0 \\ \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) + 2\pi & \text{si } \Delta x > 0 \text{ y } \Delta y < 0 \\ \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) & \text{si } \Delta x > 0 \text{ y } \Delta y \geq 0 \\ 0 & \text{resto} \end{cases} \quad (4.16)$$

donde $\Delta x = x - x_c$ y $\Delta y = y - y_c$

El resultado es una representación del contorno en coordenadas polares. Con el objetivo de evitar problemas de escala, se normaliza el parámetro distancia d dividiendo todos los valores de esta variable entre la máxima distancia. Así, todos los valores quedan entre 0 y 1 independientemente del tamaño del perfil. La Figura 4.31 muestra el descriptor obtenido para una de las regiones molde de la Figura 4.30.

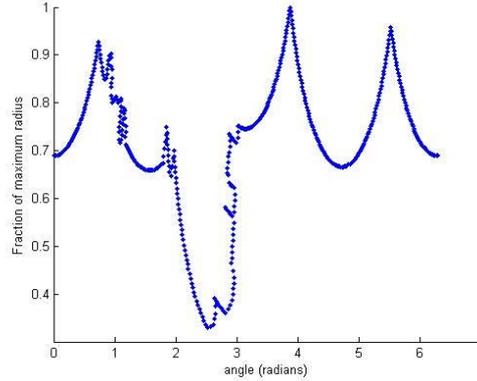


Figura 4.31: Descriptor del perfil de un molde detectado en una nube de puntos.

Test Experimental

El método de detección de moldes en interiores presentado en esta sección ha sido desarrollado y experimentado utilizando datos reales proporcionados por escáneres láser. La toma de datos se ha realizado en la Escuela Superior de Informática de la UCLM, en Ciudad Real.

La clasificación de perfiles se ha llevado a cabo mediante un algoritmo KNN (del inglés *k-nearest neighbours*, o mejores vecinos), evaluando el entorno de los 8 vecinos más cercanos a la muestra comparada.

Evaluando el área encerrada entre ambas curvas, pertenecientes a los perfiles escaneado y almacenado en la base de datos, se determina si ambos moldes concuerdan. Para realizar este cálculo, se plantea una variación de la suma de Riemann, tal que:

$$R = \sum_{i=1}^n |d_i - d'_i|(\theta_i - \theta_{i-1}) \quad (4.17)$$

donde θ_i, d_i son los pares de puntos para la normalización de cada uno de los contornos, siendo d_i y d'_i las funciones de distancia del contorno de test y de uno de los modelos en la base de datos.

Para realizar el ensayo experimental, se ha tomado una base de datos proporcionada por fabricantes de molduras en un formato CAD. Se ha escogido un

método de clasificación supervisada que permita reconocer las molduras segmentadas de los datos proporcionados por el escáner, a pesar de las imperfecciones en la fabricación, oclusiones y errores en la toma de datos.

Para esta clasificación se ha contado con una base de datos de 20 perfiles, a partir de los cuales se ha generado un conjunto de prueba mediante inyección de ruido (entre un 0 y un 10 % del modelo original). En total se cuenta con 200 perfiles, de los cuales, 140 son tomados como referencia y los 60 restantes se clasifican según el proceso mostrado anteriormente.

La Tabla 4.1 muestra los resultados obtenidos para los distintos niveles de ruido considerados. Se comprueba que para niveles de ruido menores del 4 % la tasa de éxito en la clasificación es muy elevada, mientras que por encima del 4 % la tasa de error es notable. En la Figura 4.32 se muestran perfiles de la base de datos con mayor grado de similitud y que han generado una mayor confusión a la hora de llevar a cabo la clasificación.

| Ruido introducido (%) | Tasa de error (Valor absoluto) | Tasa de error (%) |
|--------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| 0 | 0/60 | 0 |
| 1 | 0/60 | 0 |
| 2 | 3/60 | 5 |
| 4 | 12/60 | 20 |
| 6 | 22/60 | 36.6 |
| 8 | 31/60 | 51.6 |
| 10 | 42/60 | 70 |

Tabla 4.1: Error cometido en la clasificación de perfiles.

Tras comprobar los resultados obtenidos en el proceso de clasificación, se han realizado diversas pruebas con datos reales procedentes de un escáner 3D. Siguiendo el procedimiento presentado en esta sección, se obtiene el perfil de cada moldura y se lleva a cabo el proceso de clasificación. En la Figura 4.33 se muestran los descriptores de molde de test y del prototipo de la clase reconocida que corresponde a la moldura extraída en la Figura 4.30.

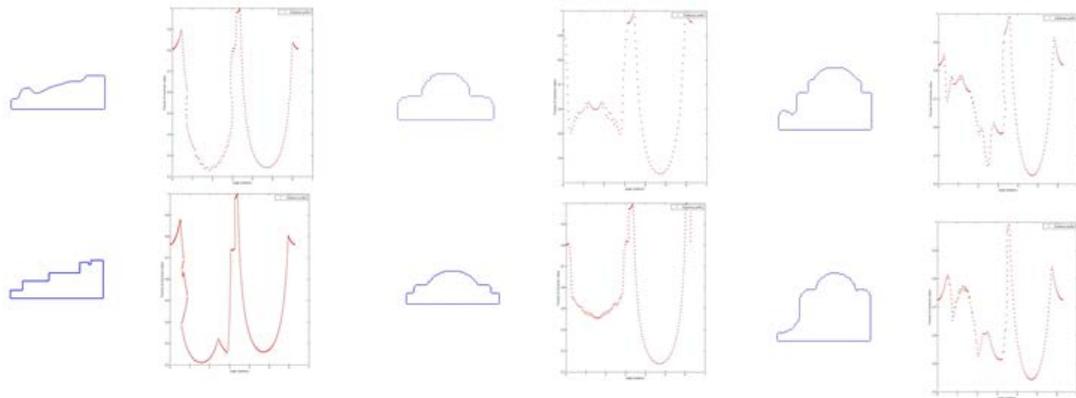
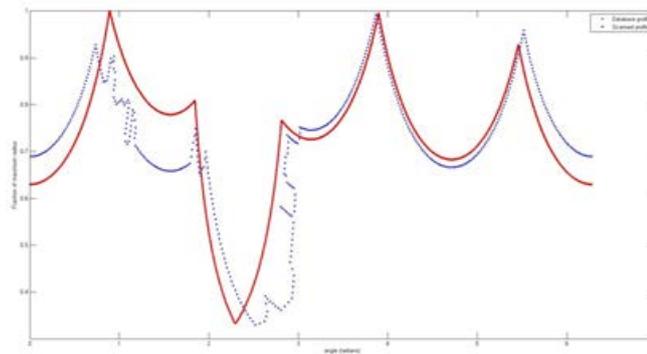


Figura 4.32: Parejas de perfiles similares en la base de modelos junto con su descriptor de forma.



(a)



(b)

Figura 4.33: Clasificación de una moldura extraída de la nube de puntos. a) Superposición de los descriptores de firma de la moldura y del prototipo de clase. b) Región de molde y región prototipo de la clase asignada.

Finalmente, en la Figura 4.34 se muestra el ajuste de diferentes perfiles a nubes de puntos del entorno de huecos correspondientes a puertas y ventanas.

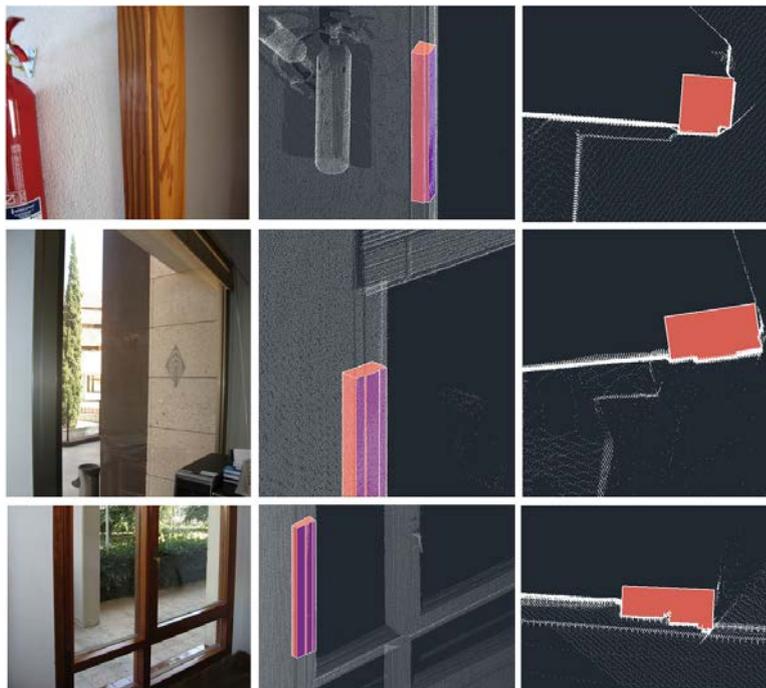


Figura 4.34: Ajuste de perfiles para tres huecos detectados en paredes sensadas.

4.4. Determinación de huecos no enmarcados

A lo largo del apartado anterior se desarrolla el proceso para detectar, en nubes de puntos correspondientes a paredes, huecos rodeados por molduras. Sin embargo, y como se ha mencionado previamente en este documento, otros tipos de huecos también deben considerarse.

4.4.1. Huecos correspondientes a vanos sin enmarcar

En primer lugar, hay que tener en cuenta los vanos en la pared. Estos huecos aparecen por la presencia de puertas, ventanas, u otros elementos constructivos que no están rodeados por un marco. Un ejemplo de este tipo puede observarse en

la Figura 4.35, donde una ventana se aloja en el vano de una pared. En la imagen de la izquierda puede apreciarse cómo el hueco de la pared no está rodeado por una moldura.

En estos casos, la proyección sobre el plano perpendicular a la dirección axial de los segmentos que rodean el hueco (en azul en la imagen derecha de la Figura 4.35) forman un ángulo recto. Esta distribución de los puntos del entorno, hace que se cumpla la condición de no uniformidad del perfil, la cual permite considerar un segmento como parte de una moldura. En la base de datos de molduras se dispone, por tanto, de un perfil de forma cuadrada que se ajusta a este tipo de huecos. Así, este tipo de huecos se estudia del mismo modo que los presentados en el apartado anterior.

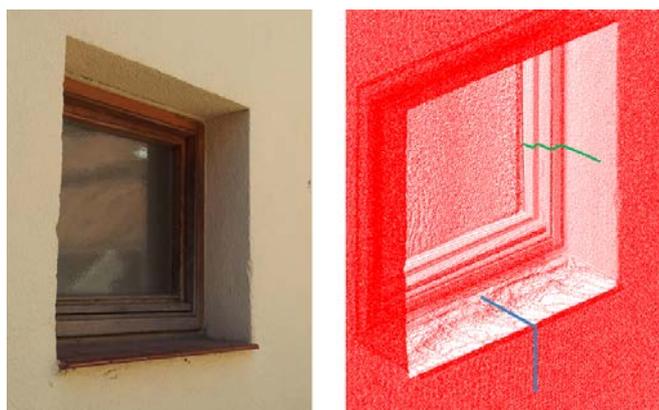


Figura 4.35: Hueco no enmarcado.

Sin embargo, a la hora de clasificar estos huecos, no se puede afirmar si se corresponden con puertas o ventanas. Simplemente se identificarán como huecos estructurales en la pared.

4.4.2. Huecos debidos a la falta de datos 3D

Por otra parte, en las nubes de puntos asociadas a cada pared, aparecen determinadas zonas en las que faltan datos, ya sea debido a las oclusiones producidas por determinados elementos en el escenario, porque el escáner no ha podido sensar dicha región o porque no haya información 3D en esa zona.

Un ejemplo se puede apreciar en la Figura 4.36, donde diferentes objetos como sillas o mesas se interponen entre el haz láser y la pared. En la nube de puntos de la pared se visualizan unas zonas blancas, que se corresponden con la falta de datos en las zonas ocluidas.

Como se menciona anteriormente, también puede darse el caso de que el escáner no haya adquirido datos 3D de una región de la pared. Este hecho puede producirse por el tipo de material de la zona, su color o índice de reflectividad.

Este tipo de huecos, debidos a la falta de datos, se corresponden con las zonas vacías de la pared que no están encerradas en los huecos definidos anteriormente, ya sean rodeados por molduras o huecos estructurales sin enmarcar.

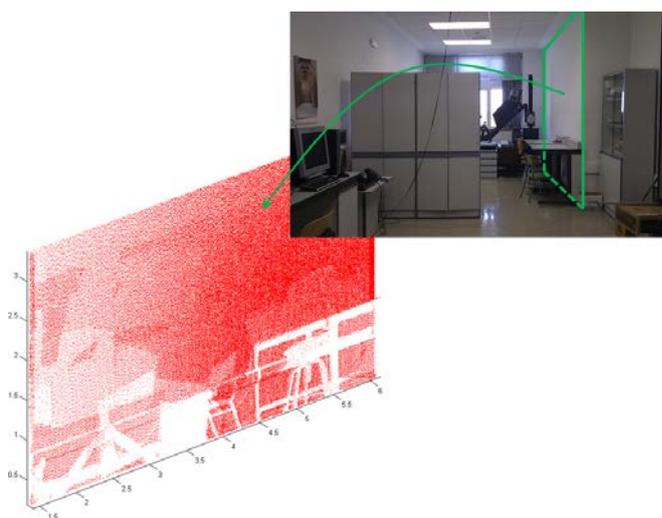


Figura 4.36: Oclusiones en una pared debidas a la presencia de mobiliario.

4.5. Determinación de otros elementos: columnas

Una vez segmentados los muros que conforman un escenario interior e identificados los huecos correspondientes a puertas y ventanas, se determinan las columnas presentes en la escena.

Para ello, se dispone de los datos 3D sensados por el escáner láser, de los cuales se han eliminado los correspondientes al conjunto de muros. La Figura 4.37 ilustra un ejemplo de la posición de partida con los datos 3D disponibles para la detección de columnas.

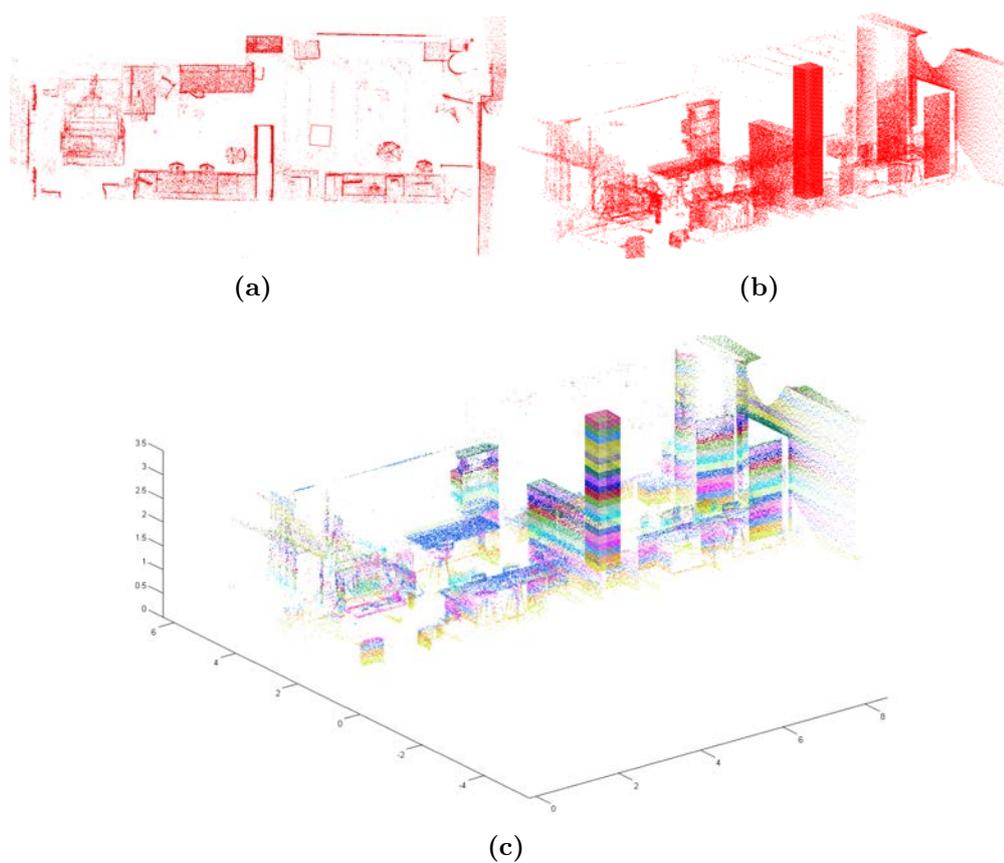


Figura 4.37: Vistas cenital (a) y en perspectiva (b) de los datos 3D del interior de una habitación, habiendo sustraído los datos pertenecientes a muros. c) División de la nube de puntos 3D en franjas.

En las construcciones civiles, las columnas son elementos constructivos cuya sección es, como norma general, invariable a lo largo de su eje. Otra característica común a estos componentes es que su eje longitudinal es perpendicular al plano del suelo. Estas dos propiedades permiten identificarlas con cierta facilidad en un conjunto de puntos 3D.

En primer lugar, aprovechando las características mencionadas anteriormente, se dividen los datos en franjas de cierta anchura paralelas al plano del suelo. En la Figura 4.37c se muestran, en colores diferentes, cada una de las franjas en las que se divide el conjunto de datos. Como se aprecia, diferentes elementos presentes pueden causar oclusiones en las columnas. Dichos componentes, ya sean estructurales o móviles, impiden que las columnas sean sensadas por el escáner en su totalidad. Por lo tanto, para identificar las columnas que forman parte de la estructura del escenario, el estudio se centra en la parte superior de la nube de puntos, ya que esta zona es menos propicia a ser ocluida.

Para llevar a cabo este proceso de identificación, se empieza por seleccionar las franjas próximas al techo y por crear una imagen binaria por proyección sobre un plano paralelo al suelo.

A continuación, se realiza un proceso de etiquetado de regiones y se filtran regiones mínimas, considerando *bounding boxes* mínimas de 15x15 centímetros.

Posteriormente, se extraen los puntos 3D correspondientes a cada región etiquetada y se acomete un proceso de ajuste a columnas de base circular o rectangular, por ser estas secciones las más empleadas en la construcción de dichos elementos constructivos. Por tanto, en este estudio se han considerado dichas geometrías, identificándose estos objetos a partir del ajuste de ortoedros y/o cilindros a las nubes de puntos. La Figura 4.38 ilustra el proceso de segmentación de columnas.

El algoritmo de ajuste consta de dos fases. En la primera, se determina el tipo de columna y se fija la dimensión de la base de la misma, utilizando las regiones etiquetadas en la imagen binaria. En la segunda, se posiciona el modelo de columna en la escena 3D.

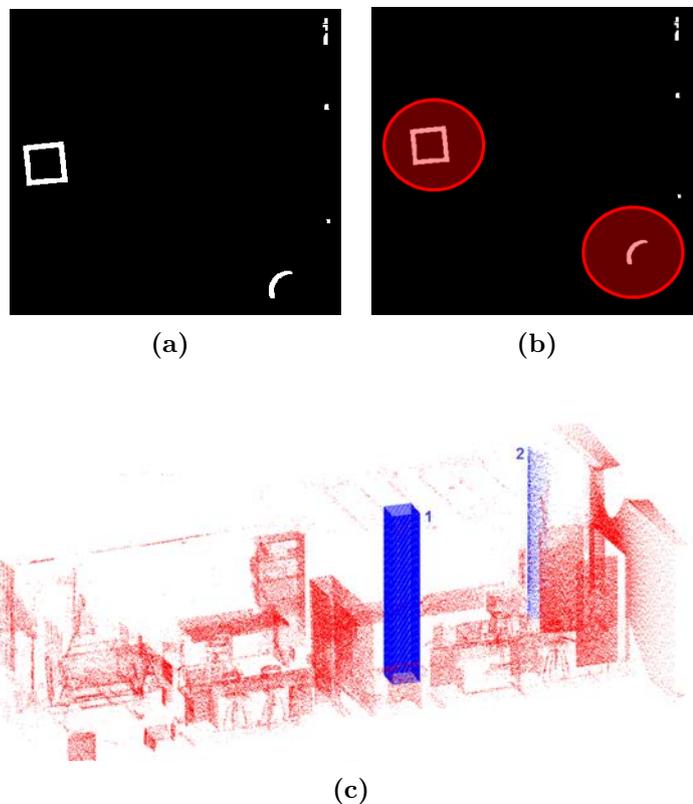


Figura 4.38: a) Píxeles ocupados en la parte superior de la habitación. b) Segmentos candidatos a contener una columna. c) Nube de puntos de un escenario bajo estudio. En azul, las dos columnas presentes.

4.5.1. Ajuste de la base de una columna a una circunferencia

En esta sección se detalla el procedimiento por el que se ajusta el conjunto de píxeles de una región etiquetada a una circunferencia. Sea P el conjunto de píxeles de una región etiquetada.

Una circunferencia está definida por la ecuación

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0 \quad (4.18)$$

Dicha circunferencia tiene por centro (x_c, y_c) y por radio r , donde

$$x_c = -\frac{a}{2}, y_c = -\frac{a}{2} \quad (4.19)$$

$$r = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 - c} \quad (4.20)$$

Para todos los puntos (x_p, y_p) pertenecientes a P debe cumplirse que:

$$ax_{p_i} + by_{p_i} + c + x_{p_i}^2 + y_{p_i}^2 = 0, i = 1 \dots k \quad (4.21)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones 4.21 en a, b, c , puede calcularse el centroide y el radio de la circunferencia aproximada mediante 4.19 y 4.20.

El cálculo del parámetro de ajuste se obtiene como sigue:

Sea la circunferencia determinada por la ecuación 4.18 y r la recta definida por

$$y = mx + n \quad (4.22)$$

la cual pasa por cada punto \mathbf{p} del conjunto P perteneciente a la columna y el centro de la circunferencia O (ver la Figura 4.39).

Sustituyendo 4.22 en 4.18,

$$\begin{aligned} x^2 + (mx + n)^2 + ax + b(mx + n) + c &= 0 \\ (m^2 + 1)x^2 + (2mn + bm + a)x + n^2 + bn + c &= 0 \end{aligned} \quad (4.23)$$

donde $A = m^2 + 1$, $B = 2mn + bm + a$ y $C = n^2 + bn + c$.

La solución a la ecuación 4.23 viene dada por

$$x_{e,f} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (4.24)$$

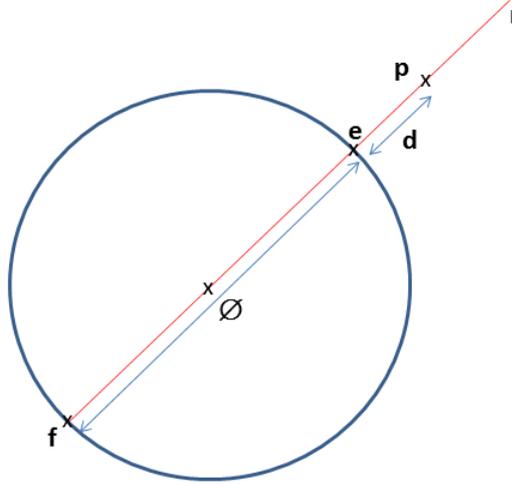


Figura 4.39: Parámetros de la circunferencia.

que son las coordenadas x de los puntos de corte de la recta r con la circunferencia. Las coordenadas y de dichos puntos pueden calcularse a partir de 4.22.

Las distancias entre el punto \mathbf{p} y los puntos de corte \mathbf{e} y \mathbf{f} son

$$d_{p,e} = \sqrt{(x_p - x_e)^2 + (y_p - y_e)^2}$$

$$d_{p,f} = \sqrt{(x_p - x_f)^2 + (y_p - y_f)^2}$$

por lo que la distancia mínima entre cada punto \mathbf{p} y la circunferencia ajustada es

$$d_{min} = \min(d_{p,e}, d_{p,f}) \quad (4.25)$$

Sumando la distancia mínima de todos los puntos del conjunto P se obtiene el parámetro de ajuste

$$\Psi_{circ} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k d_{min_j} \quad (4.26)$$

siendo k el número de puntos en P .

En el caso de la columna 1 se obtiene la aproximación ilustrada en la Figura 4.40. En color rojo, un conjunto de puntos muestra el mejor ajuste de la sección mediante una circunferencia.

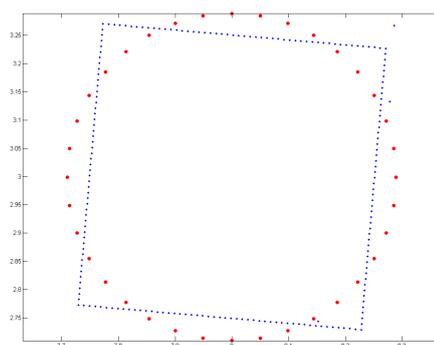


Figura 4.40: Ajuste de la sección de una columna cuadrada mediante una circunferencia.

4.5.2. Ajuste de la base de una columna a un rectángulo

En este caso, se ajusta el mismo conjunto de puntos evaluado en el apartado anterior a un rectángulo. El algoritmo se lleva a cabo mediante cinco pasos (36): se calcula la frontera del objeto generado por los puntos 2D, después se calcula el centroide y se buscan los ejes mayor y menor usando los puntos de la frontera, se determinan los puntos del objeto más lejanos a los ejes calculados y finalmente, se obtienen los cuatro vértices del rectángulo que engloba el objeto. La Figura 4.41 muestra el ajuste, mediante este método, de los puntos sensados correspondientes a la columna 1 (ver Figura 4.38c) a un rectángulo.

El cálculo del parámetro de ajuste se obtiene como sigue:

Un rectángulo se puede definir a partir de cuatro rectas r_i con ecuación

$$y = m_i x + n_i \quad (4.27)$$

que determinan los cuatro segmentos que lo forman.

Cada punto \mathbf{p} del conjunto P se encuentra a una distancia

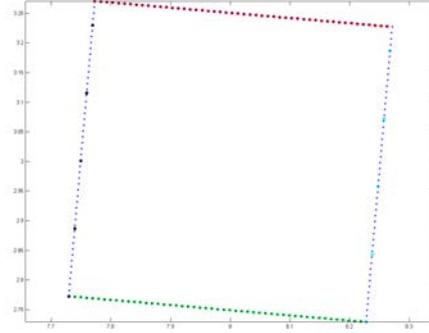


Figura 4.41: Ajuste de la sección de la columna 1 mediante un rectángulo.

$$d(p, r_i) = \frac{|m_i x_p - y_p + n_i|}{\sqrt{m_i^2 + 1}} \quad (4.28)$$

de cada una de las rectas. Como en el caso anterior, la distancia de cada punto \mathbf{p} al rectángulo viene dada por el valor mínimo de las distancias calculadas para cada recta.

$$d_{min} = \min(d_{p,r1}, d_{p,r2}, d_{p,r3}, d_{p,r4}) \quad (4.29)$$

Por lo cual, para todos los puntos del conjunto P se obtiene

$$\Psi_{rect} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k d_{min_j} \quad (4.30)$$

A continuación, se comparan los resultados obtenidos en las ecuaciones 4.26 y 4.30. El menor valor indicará un mejor ajuste y por tanto, la geometría de la base de la columna.

4.5.3. Posicionamiento del modelo de una columna en la escena

Tras determinar la forma y el tamaño de la sección de una columna, se genera un modelo 3D que se ajuste a la nube de puntos de la manera más precisa posible.

Este modelo se crea a partir de la extrusión de una circunferencia o un rectángulo a lo largo de un eje.

La sección (circular o rectangular) se calcula como se ha dicho en los apartados anteriores. Por otra parte, el eje se define a través de los centroides de las circunferencias o rectángulos ajustados para cada franja. La ecuación de la recta ajustada a los centroides permite calcular la inclinación de la columna respecto de la vertical (ver Figura 4.42).

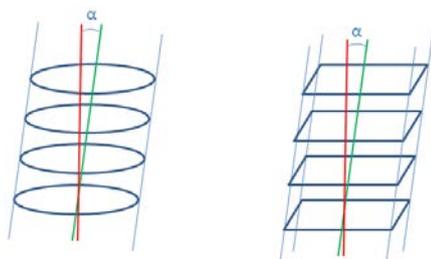


Figura 4.42: Inclinación del eje de la columna respecto a la vertical.

A partir de estos datos: radio, centroide de la base y dirección del eje, se puede generar el modelo 3D de la columna y posicionarlo en la nube de puntos.

A modo de ejemplo, la Figura 4.43 muestra dos modelos diferentes de columnas introducidos en una nube de puntos, tras determinar su forma y posición en el escenario.

4.6. Creación de modelos B-Rep estructurales

En el apartado 4.2.3 se ha presentado la generación de modelos B-Rep de contornos de interiores, a partir de los datos segmentados de paredes, suelo y techo. Sin embargo, otros elementos estructurales también se han identificado en las nubes de puntos en las secciones 4.3 y 4.5.

Los primeros de estos elementos son los huecos identificados en las paredes, correspondientes a puertas y ventanas. Estos componentes, como se aprecia en figuras de secciones anteriores, pueden definirse mediante rectángulos. Cada uno

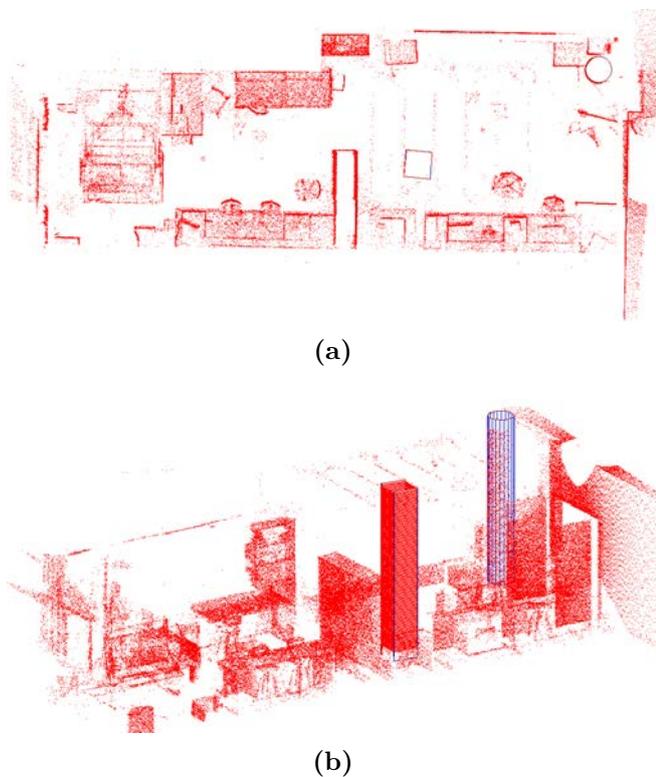


Figura 4.43: Modelos 3D de columnas posicionados en la escena. a) Vista cenital. b) Vista en perspectiva.

de estos polígonos está determinado por sus lados y sus vértices, los cuales son calculados como se indica en la sección 4.3.

Estos polígonos se incorporan al modelo B-Rep del contorno, estableciendo una nueva relación topológica entre estos elementos con los anteriores, completando el modelo B-Rep. Estas relaciones se presentan en la Figura 4.44.

En el modelo presentado en la Figura 4.44a, aparecen dos elementos tipo hueco. Uno de ellos se corresponde con una ventana y está definido por los vértices V_1, V_2, V_3 y V_4 . Como se refleja en la Figura 4.44b, dicho polígono está vinculado a la cara $EFGH$. El otro elemento determina el hueco correspondiente a una puerta y está delimitado por P_1, P_2, P_3 y P_4 . En este caso, el elemento se encuentra en la cara $ABCD$.

Además de los huecos debidos a la presencia de puertas y ventanas, se representan en el modelo B-Rep las columnas identificadas en la estancia. Este proceso

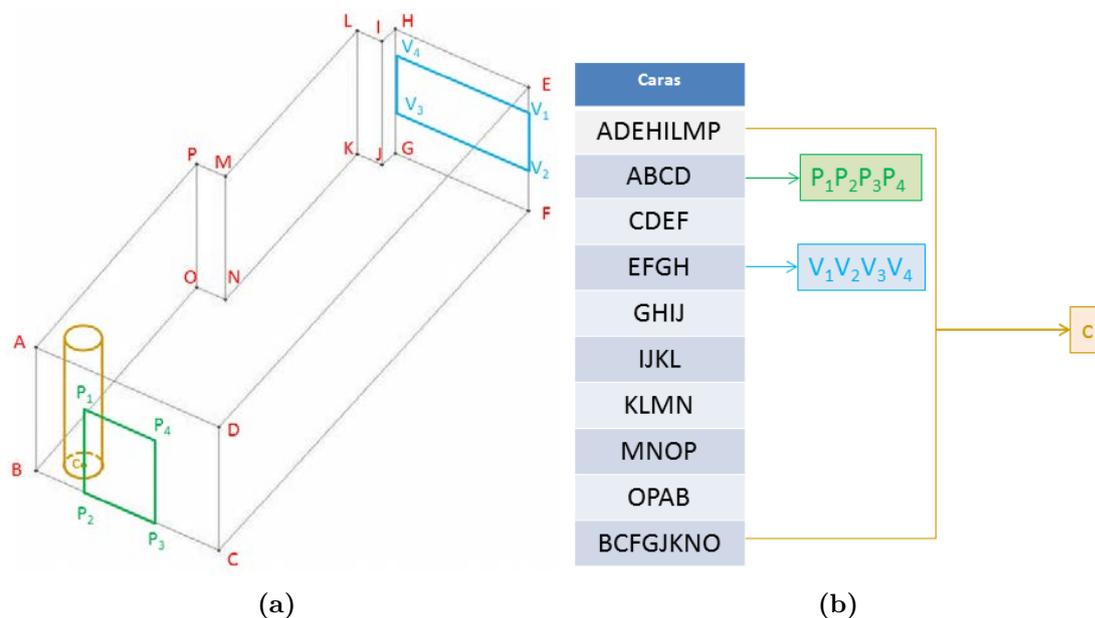


Figura 4.44: Relación topológica entre elementos estructurales. a) Puntos característicos de los componentes. b) Relación entre caras y el resto de elementos constructivos.

de identificación ha sido definido en el apartado 4.5. Las columnas se pueden representar como cilindros o paralelepípedos y están determinados por el centroide de la base, su inclinación con respecto a la vertical y un parámetro que define su sección (radio o lados, dependiendo de su geometría). En el ejemplo mostrado en la Figura 4.44a se ha introducido una columna, representada por la letra *c*. Este objeto está relacionado con las caras *BCFGJKNO* y *ADEHILMP*, correspondientes con el suelo y el techo respectivamente, como se indica en el diagrama de la Figura 4.44b.

4.7. Conclusiones del capítulo

En el presente capítulo se han desarrollado las operaciones llevadas a cabo con el objetivo de generar un modelo BIM con información referente a la estructura de un interior habitado.

Inicialmente, se determinan los principales elementos que configuran la estructura básica de una habitación: las paredes, el techo y el suelo. Aunque se han desarrollado con anterioridad trabajos en este ámbito (4) (6), en ninguno de ellos se delimitan estos elementos estructurales mediante un ajuste simultáneo de todos los muros al espacio de vóxeles, tal y como se aborda en esta tesis. Este proceso permite seleccionar, de una forma más precisa, los puntos 3D de una nube que forman parte de cada uno de muros, en función del tamaño de la habitación y de las tolerancias permitidas en construcción. También se estudian habitaciones con planta no rectangular, aspecto que tampoco ha sido contemplado en trabajos previos.

A partir de la identificación de los elementos citados anteriormente, se han generado modelos *B-Rep* de los entornos estudiados. En estos modelos se refleja la relación existente entre componentes estructurales y a partir de esta información se genera un diseño de las estructuras que acotan diferentes interiores habitados.

A continuación, se delimitan las diferentes zonas sin información 3D (huecos) detectadas en las paredes segmentadas anteriormente. Estos huecos pueden encontrarse enmarcados o no por molduras. En el primer caso, además de determinar la posición y el tamaño de los huecos, se estudian las geometrías de los marcos que los rodean. Este estudio de los marcos permite identificar, a partir de una base de datos de modelos 3D, qué molduras enmarcan cada hueco, añadiendo información adicional al modelo BIM. Esta identificación de moldes también se presenta como una novedad en el ámbito de creación de modelos 3D de interiores.

Finalmente, se identifican otros elementos estructurales como son las columnas. De estos componentes se determina su perfil y su inclinación, permitiendo generar objetos 3D que serán añadidos a los modelos BIM.

Modelo BIM: Elementos no permanentes en interiores

5.1. Visión general de la técnica

En el capítulo anterior, dedicado a la identificación de estructuras básicas de escenarios interiores y a su modelado 3D, no se tiene en cuenta la información obtenida de las etiquetas RFID. En este caso, sin embargo, con el fin de facilitar la labor de reconocimiento y hacer más ligero el tratamiento de los datos 3D, se considera este tipo de información. En las etiquetas RFID adheridas a los distintos componentes del escenario, se almacena información referente a la geometría y al color de los mismos. La gestión de esta información se desarrolla en la subsección 5.2.

Como muestra el diagrama de la Figura 5.1, para identificar cada tipo de objeto se lleva a cabo un algoritmo distinto. En cada uno de estos algoritmos, los parámetros de entrada son: los datos 3D a los que se les ha sustraído la información correspondiente a elementos segmentados previamente y la información extraída de las etiquetas vinculadas a ese tipo de objetos. Por ejemplo, para la identificación de los elementos tipo silla, se introducen en el algoritmo los datos 3D del entorno de los que se ha eliminado la información correspondiente a elementos estructurales y a objetos tipo mesa.

Una vez identificado cada uno de los objetos, se calcula su posición y orientación y se introduce su correspondiente reproducción 3D al modelo BIM.

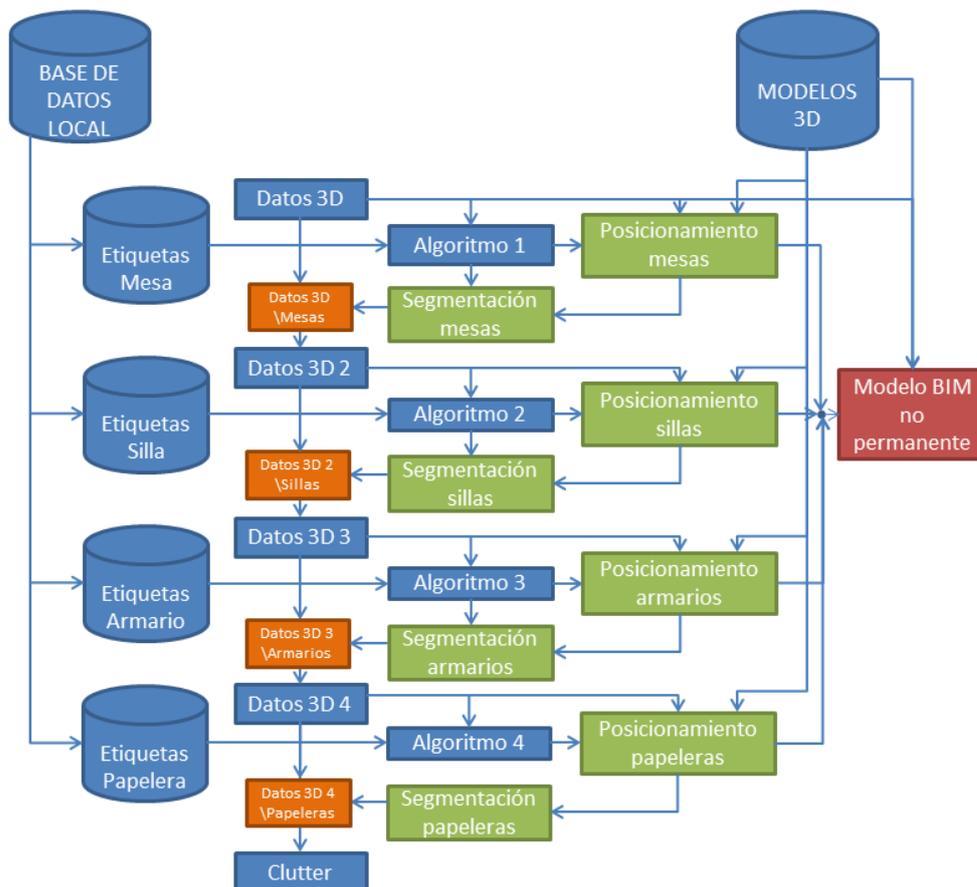


Figura 5.1: Diagrama de bloques de la identificación y posicionamiento de elementos no permanentes.

5.2. Gestión de la información almacenada en etiquetas RFID

Como se menciona anteriormente, información referente a la geometría y el color de determinados elementos que forman parte de una escena es empleada para identificar más fácilmente estos objetos en una nube de puntos. Estos datos, relativos a elementos no permanentes, son codificados y almacenados en etiquetas

RFID. Posteriormente, esta información es leída por un sensor y transferida a un computador, donde se decodifica e interpreta. Todos estos procesos se muestran con detalle en el presente apartado.

La primera tarea que debe realizarse es el análisis geométrico de los elementos a los que se van a adherir las etiquetas. Así, se estudia cuáles son los parámetros que mejor definen un objeto no permanente. En la Tabla 5.1 se presentan las magnitudes que se incluyen en las etiquetas para cada uno de los objetos que se van a identificar en las nubes de puntos. Como se aprecia en dicha tabla, en las etiquetas también se registra información relacionada con el color de las diferentes piezas de mobiliario.

| Tag | Información almacenada |
|------------|--|
| Mesa | altura, área del tablero, color |
| Armario | dimensión de los tres planos, color |
| Silla | tipo, longitud y separación de las patas, color |
| Papelera | altura, dimensiones de la sección, color |

Tabla 5.1: Datos introducidos en las etiquetas.

Cada uno de estos objetos no permanentes es definido por un conjunto de parámetros. Así, una mesa cuyo tablero es rectangular puede ser identificada a partir de las dimensiones del mismo y la altura a la que éste se encuentra. Un armario puede considerarse un paralelepípedo, cuyas dimensiones facilitan su segmentación. Las sillas se definen a partir del patrón que determinan sus apoyos en el suelo. Finalmente, una papelera puede identificarse en una nube de puntos conociendo su altura y las dimensiones de la sección que la define.

Una vez estudiada y decidida la información que ayudará a identificar los diferentes elementos no permanentes (en este caso: mesas, sillas, armarios y papeleras), se llevan a cabo los procesos de codificación de datos y escritura en las etiquetas, los cuales son presentados en detalle a continuación. Estas dos fases se muestran en la Figura 5.2.

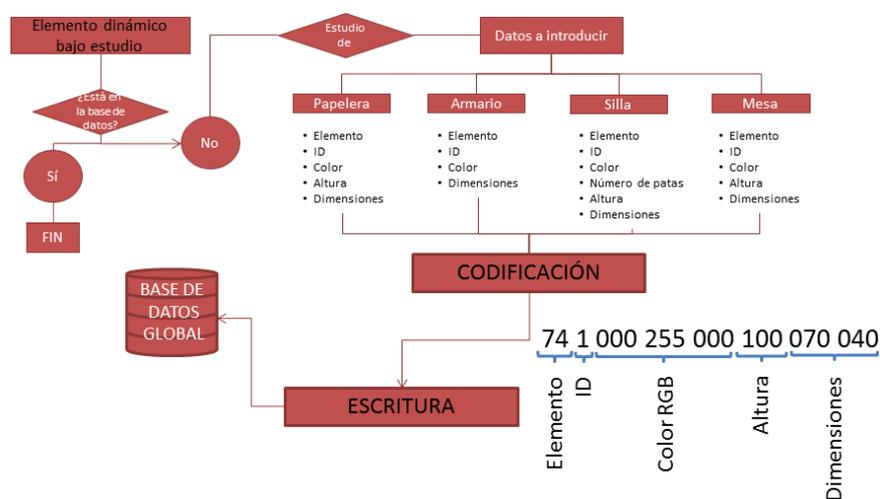


Figura 5.2: Proceso de gestión de la información.

Para cada uno de los objetos no permanentes que no están registrados en la base de datos, se lleva a cabo un estudio de los parámetros que deben registrarse en las etiquetas RFID. Los valores de estos parámetros son codificados y escritos en la etiqueta correspondiente según se detalla en los apartados siguientes.

5.2.1. Codificación

La idea de partida es la de “economía de datos”. La memoria de las etiquetas estándar suele ser bastante reducida, por lo que se busca comprimir los datos lo máximo posible. De inicio, se cuenta con etiquetas en las que se pueden leer/escribir 96 bits, los cuales se corresponden con su código de identificación EPC (del inglés *Electronic Product Code*). Por tanto, se pretende crear un código (una cadena numérica) que contenga los datos indicados en la Tabla 5.1, para cada objeto etiquetado.

Los datos son almacenados en la etiqueta en formato hexadecimal, lo que implica que se pueden escribir los números del 0 al 9, y letras de la A a la F. El resto de símbolos necesita al menos dos caracteres para ser representados. De los datos almacenados en las etiquetas, únicamente el dato “tipo de elemento” no es numérico, lo que implica la conversión caracteres a hexadecimal. Como se ha

mencionado, se busca la economía de datos, por lo que la inicial del objeto será suficiente para identificarlo. A continuación se muestra la codificación llevada a cabo para cada tipo de objeto.

Mesa

- *Elemento*: “Mesa”. La inicial, en inglés *t*, es representada en código hexadecimal
- *ID*: número que diferencia cada mesa del resto de mesas
- *Color*: vector RGB con el color del objeto
- *Altura*: en cm, altura a la que se encuentra el tablero
- *Dimensiones*: en cm, largo y ancho del tablero

Silla

- *Elemento*: “Silla”. La inicial, en inglés *c*, es representada en código hexadecimal
- *ID*: número que diferencia cada silla del resto
- *Color*: vector RGB con el color del objeto
- *Número de apoyos* que sirven de soporte
- *Altura*: en cm, altura a la que se evalúan los apoyos
- *Dimensiones*: en mm, dimensiones características entre apoyos

Armario

- *Elemento*: “Armario”. La inicial, en inglés *w*, es representada en código hexadecimal
- *ID*: número que diferencia cada armario del resto

- *Color*: vector RGB con el color del objeto
- *Dimensiones*: en cm, dimensiones del paralelepípedo

Papelera

- *Elemento*: “Papelera”. La inicial, en inglés *b*, es representada en código hexadecimal
- *ID*: número que diferencia cada papelera del resto
- *Color*: vector RGB con el color del objeto
- *Altura*: en cm, altura del objeto
- *Dimensiones*: en cm, radio o lado de la sección

Sirva como ejemplo el código mostrado en la Figura 5.2. De dicho código se extrae que el objeto al que está adherida la etiqueta es una mesa, con el identificador 1 y de color verde. El tablero está a una altura de 100 cm y sus dimensiones son 70x40 cm.

5.2.2. Escritura

Una vez que se han generado las cadenas de caracteres a almacenar en cada una de las etiquetas, se procede a la escritura de datos. En este proceso, las etiquetas pueden estar o no adheridas a los objetos, siempre que estén en el rango de lectura del dispositivo y se tengan en cuenta las condiciones mencionadas en el apartado 2.2.2.1.

Para llevar a cabo esta acción, se recurre al software propio del lector/escritor (Figura 5.3), desarrollado por el fabricante. Bastará con seleccionar la etiqueta cuyo contenido se quiere modificar y escribir los datos nuevos, que serán los obtenidos para cada elemento no permanente en el apartado anterior.

Los códigos EPC han de tener un número par de caracteres hexadecimales (grupos de cuatro caracteres), por lo que se debe completar el código anterior

si esta condición no se cumple. Al estar trabajando con código numérico en los códigos EPC y no emplear los caracteres alfabéticos (A-F), por tener capacidad de memoria suficiente, se rellena el código con caracteres 'A'. De esta manera, se salva la condición anterior y no surgen problemas en la segmentación de códigos cuando, posteriormente, se lea la etiqueta.



Figura 5.3: Ventana del software empleado para la modificación del contenido de las etiquetas.

5.2.3. Lectura

Durante el proceso de escaneo de la habitación también se realiza el proceso de lectura de etiquetas mediante el sistema RFID. La realización de diferentes escaneos, en distintas posiciones para cubrir con precisión la totalidad del entorno, hace que se registre el contenido de las etiquetas desde distintos puntos de la habitación. De esta manera, se evitan posibles problemas de lectura, a pesar de que el alcance del sistema RFID es de más de una decena de metros.

Para llevar a cabo este proceso de captura de datos, se ha realizado un procedimiento destinado a detectar las etiquetas y a extraer la información que hay grabada en ellas. Después de un proceso de decodificación de la información, se genera un fichero de texto plano que almacena el contenido de la memoria de cada etiqueta. El siguiente diagrama (Figura 5.4) muestra el procedimiento seguido.

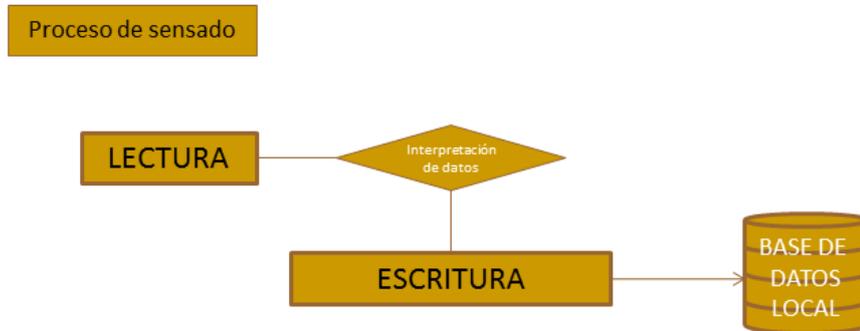


Figura 5.4: Diagrama de flujo explicativo del proceso de lectura.

5.2.4. Decodificación

Finalizado el proceso de lectura de todas las etiquetas, se genera una carpeta que contiene un conjunto de ficheros correspondiente al total de elementos etiquetados en una habitación. La última tarea a realizar con los datos procedentes de las etiquetas RFID, para poder usarlos posteriormente en el proceso de segmentación de datos 3D, consiste en su decodificación.

Para ello, se leen todos los ficheros de texto generados a lo largo del procedimiento explicado en el apartado anterior y se crea una matriz de orden $m \times n \times p$, siendo p el número de elementos etiquetados. Las diferentes submatrices $m \times n$ (ver Figura 5.5) contienen los datos relativos a cada objeto, utilizados posteriormente en el proceso de segmentación de la nube de puntos 3D.

Después de obtener los datos registrados en las etiquetas RFID, correspondientes a las propiedades de los objetos no permanentes que se desean identificar, el siguiente proceso consiste en emplear dicha información para continuar con la segmentación de la nube de puntos. Las próximas secciones de este capítulo describen cómo se localizan y posicionan en la escena los diferentes objetos básicos de tipo no permanente (mesas, sillas, armarios y papeleras) detectados por el sistema RFID.

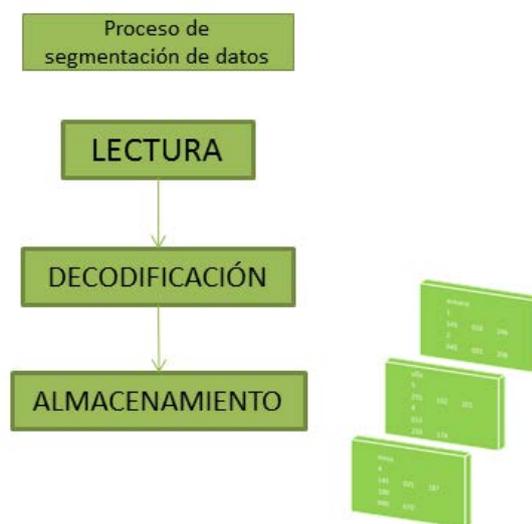


Figura 5.5: Almacenamiento de los datos relativos a cada objeto etiquetado.

5.3. Reconocimiento de objetos tipo “Mesa”

En el caso de la detección de mesas en la nube de puntos, se ha extraído de las etiquetas información relativa a su altura y al área del tablero. El dato correspondiente a la altura del tablero permite buscar superficies planas, en el escenario escaneado, en un estrecho rango de alturas. Para establecer este valor de altura, se toma como referencia en el eje Z el centroide del plano de vóxeles correspondiente al suelo, cuyo cálculo se detalla en el apartado 4.2.1.

5.3.1. Segmentación de tableros de mesas

El primer paso a realizar para la identificación de elementos tipo mesa consiste en obtener una franja de puntos 3D, paralela al plano XY , a la altura de cada una de las mesas etiquetadas con *tags* RFID. Para cada mesa, la franja de datos 3D tendrá como valor central en el eje Z la altura del tablero indicada por el *tag* correspondiente. La anchura de la franja ε será, en todos los casos, de 5 centímetros. Este valor de tolerancia permite seleccionar la mayoría de los puntos del tablero, teniendo en cuenta ligeras inclinaciones el tablero o irregularidades

en el mismo. Una vez llevada a cabo esta operación, se convierte la sección de puntos 3D a una imagen binaria.

A continuación, se acomete un procesamiento de imagen que consiste en realizar un filtrado de pequeñas zonas y píxeles espurios, un proceso morfológico de erosión y un proceso de etiquetado de regiones.

Obtenidas las regiones etiquetadas, se extraen los correspondientes puntos 3D, de modo que los segmentos de datos de cada tablero queden disponibles. Con el fin de facilitar el procesamiento de estos puntos 3D para etapas posteriores, se realiza una discretización en vóxeles de dimensión ε para cada franja de datos, donde un vóxel ocupado contiene uno o varios puntos 3D.

La Figura 5.6 ilustra el procedimiento de segmentación. En *a)* se muestra la imagen binarizada obtenida para una cierta franja de puntos de la escena. En *b)* se pueden apreciar el conjunto de segmentos candidatos a mesa para dicha franja de puntos. En *c)* se muestra (en rojo) una rejilla formada por los centroides de los vóxeles ocupados en el segmento etiquetado con el número 2 en la Figura 5.6b. En azul, aparecen los puntos 3D ubicados dentro de esos vóxeles.

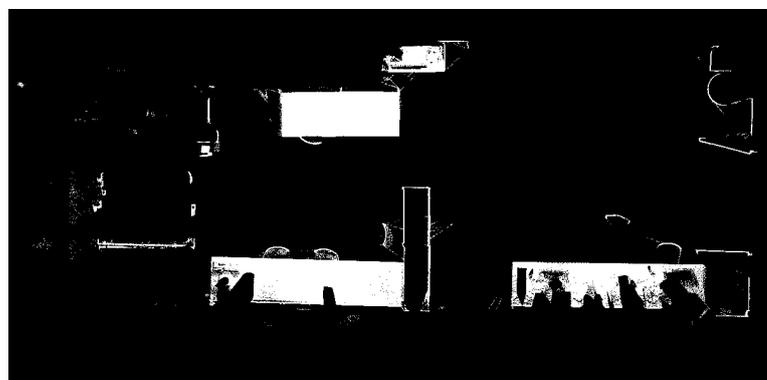
5.3.2. Reconocimiento y posicionamiento aproximado

Para analizar si los puntos 3D de una región etiquetada pertenecen o no a un tablero de mesa se estudia si estos se ajustan a un plano horizontal o no. Este procedimiento se puede llevar a cabo mediante la evaluación de las normales de la región mediante una matriz *scatter*.

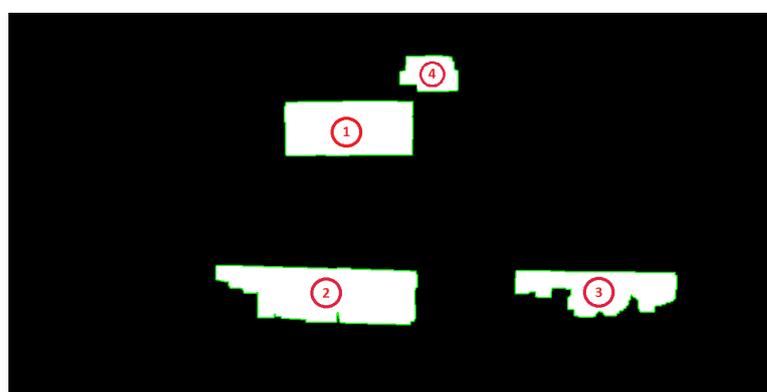
Dado un conjunto de puntos P en \mathbb{R}^3 , la matriz *scatter* se define como la matriz simétrica M , tal que:

$$M = \sum_i x_i^T x_i \quad (5.1)$$

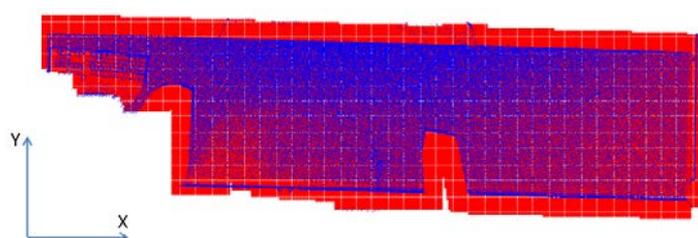
Donde para cualquier punto $p_i(x_i, y_i, z_i) \in P, x_i = (w_i x_i, w_i y_i, w_i z_i)$, siendo w_i un coeficiente ponderado, el cual es inversamente proporcional a la distancia entre un punto de referencia del conjunto y el punto p_i . En el caso de evaluar la



(a)



(b)



(c)

Figura 5.6: a) Imagen binarizada de una sección de datos 3D. b) Segmentos candidatos a mesa. c) Puntos 3D (en azul) ubicados en uno de los segmentos extraídos.

zona en la que se encuentra ubicado el tablero de una mesa, se tomará el conjunto de puntos P contenido en cada vóxel y como referencia su centroide.

Luego, de los tres autovectores de la matriz *scatter* M , los dos autovectores \underline{v}_1 , \underline{v}_2 correspondientes a los dos autovalores mayores e_1 , e_2 , son los dos vectores que determinan el plano tangente a la superficie definida por los puntos, mientras que el autovector \underline{v}_3 , correspondiente al menor autovalor e_3 , apunta en la dirección normal de la superficie (111).

Evaluando la normal de los distintos centroides, se puede delimitar la región perteneciente al tablero. Para determinar las zonas límite del mismo, se calcula el ángulo que forma cada una de estas normales con el eje Z (Figura 5.7b). Estos valores de ángulo se reflejan en un histograma, cuyo valor máximo indica el ángulo aproximado que forma la normal del tablero con el eje Z . Para indicar un rango de ángulos que permita seleccionar los puntos que forman parte del tablero, se evalúa el histograma y se establece como referencia el pico de la gaussiana ajustada (ver Figura 5.7a). Debido a ligeras inclinaciones de los tableros, a la presencia de objetos sobre las mesas e incluso al error intrínseco de los datos, el máximo del histograma puede ser distinto de 0° .

Además, se realiza un filtro de vóxeles del tablero, para normales por encima de una desviación de 10° respecto del valor central de la gaussiana.

En la Figura 5.7b puede apreciarse cómo las regiones límite de la mesa son de un color más oscuro. Esto se debe a que las normales de los bordes del tablero forman un ángulo de en torno a de 90° con el eje Z .

Finalmente, se ajusta la nube de puntos del tablero sensado a alguno de los tableros de los modelos 3D reconocidos por las etiquetas RFID, teniendo en cuenta la altura y las dimensiones del tablero. El ajuste de modelo y nube de puntos se lleva a cabo mediante un algoritmo ICP (del inglés *Iterative Closest Point*) (106).

Un primer ajuste burdo se realiza mediante un algoritmo de matching entre puntos de alta curvatura de los contornos del modelo (C_M) y de la escena (C_E).

Se evalúan entonces todos los puntos de mayor curvatura en el modelo y en el candidato y se van emparejando los máximos del primero con los del segundo. Después de cada una de estas transformaciones (ver Figura 5.9a), se ejecuta el algoritmo ICP que ajustará con precisión ambas nubes de puntos en un entorno 3D.

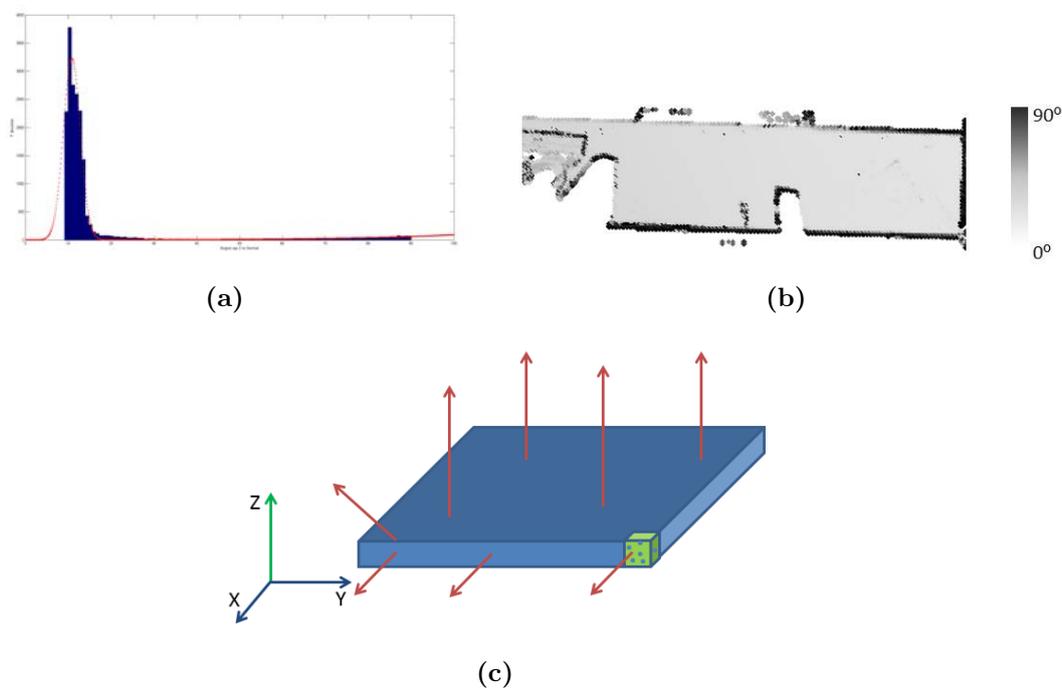


Figura 5.7: Evaluación del ángulo entre normales y eje Z . a) Histograma. b) Evaluación por centroides. c) Direcciones normales para diferentes regiones del tablero.

En el caso del modelo de mesa, se cuenta con una rejilla de puntos equiespaciados 2 centímetros (P_M), delimitados por el contorno C_M . La coordenada Z viene dada por la altura indicada por las etiquetas RFID. Para el conjunto de puntos candidato a mesa, se toma el conjunto de puntos 3D P_E contenidos dentro del contorno C_E . La Figura 5.8 ilustra los contornos que servirán de inicio al proceso de ajuste y los modelos que se ajustarán con mayor precisión.

Este algoritmo va ajustando, de forma iterativa, el modelo al objeto escaneado. La convergencia del algoritmo se puede definir mediante dos parámetros distintos. El primero viene dado por el usuario mediante un número concreto de iteraciones. El otro parámetro es el error cometido en el ajuste de ambos conjuntos de datos. Este valor se calcula para cada una de las iteraciones y si es menor que el umbral determinado por el usuario, el proceso habrá terminado.

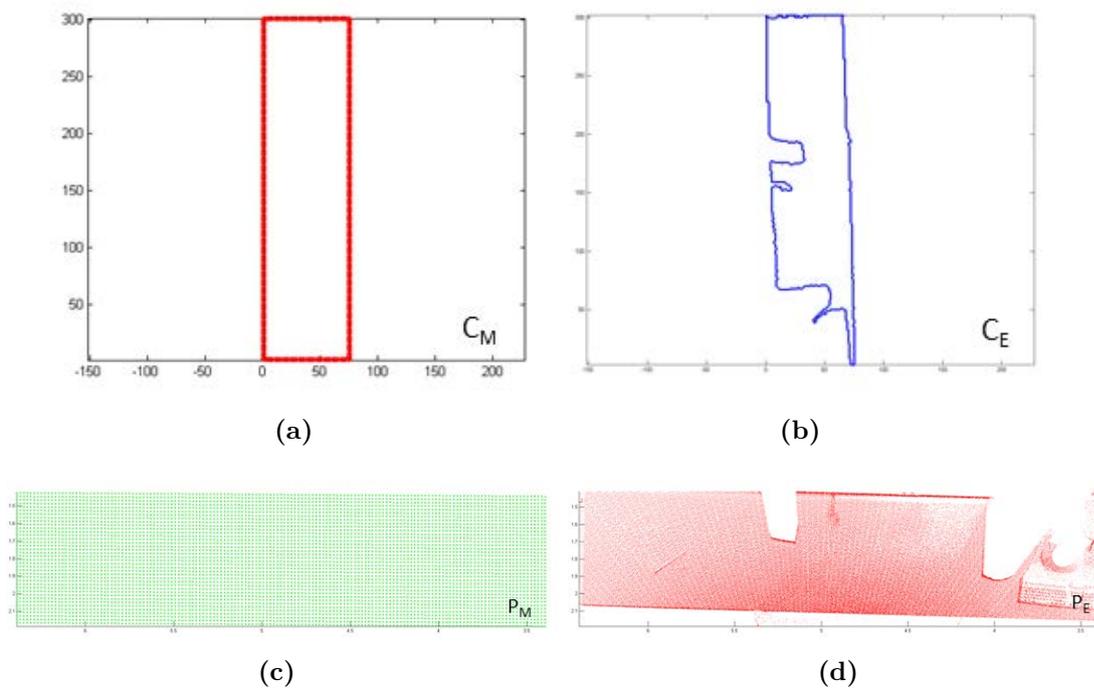


Figura 5.8: Contornos de modelo (a) y de candidato (b) a mesa y conjuntos de puntos del modelo (c) y del candidato (d) a ajustar mediante el algoritmo ICP.

En la Figura 5.9 se muestra un ejemplo donde puede apreciarse la posición de ambos conjuntos de puntos (escaneado y modelo) en la posición de inicio del algoritmo ICP (a) y tras 50 iteraciones (b).

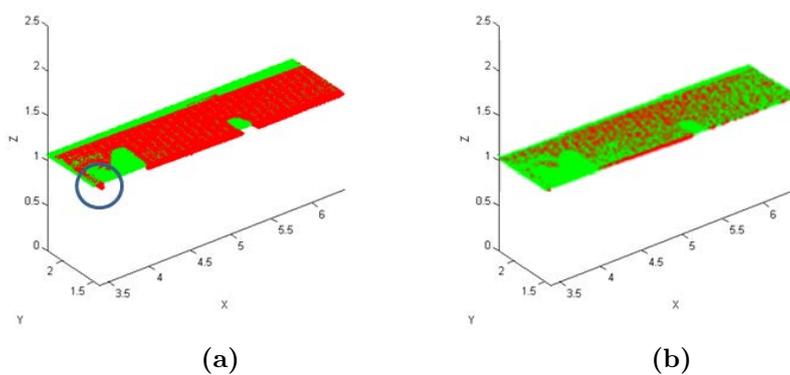


Figura 5.9: Ajuste entre modelo del tablero y los datos escaneados mediante un algoritmo ICP. Posiciones inicial (a) y final (b).

Como se ha mencionado anteriormente, puede darse el caso de que coexistan varios candidatos a mesa a una altura determinada. En este caso, deberán evaluarse todos ellos, intentando ajustar a los mismos todos los posibles modelos sintéticos de nuestra base de datos cuya altura coincida.

Si se produce este conflicto, la forma de seleccionar el ajuste correcto es mediante la evaluación del cociente entre área del modelo y área del tablero escaneado. El ajuste cuyo cociente más se aproxime a 1, es el seleccionado para ubicar el modelo en la nube de puntos.

En algunas ocasiones puede darse que existan candidatos a mesa que, finalmente, no lo sean, a pesar de ajustarse el conjunto de datos que contiene a uno de los modelos de la base de datos.

Sean:

k el número de etiquetas RFID detectadas por el sensor en el escenario y

p el número de segmentos candidatos a mesa.

- Si $k = p$, el número de etiquetas corresponde con el de candidatos. Se considera que todas las mesas han sido identificadas.
- Si $k < p$, se han detectado menos etiquetas que candidatos a mesa. Se descartará el segmento que se ajuste peor (su coeficiente entre áreas difiera más de 1) a los modelos indicados por las etiquetas.
- Si $k > p$, se ha producido un error. Lo más probable es que la altura indicada por las etiquetas no sea correcta. También puede ocurrir que el tablero de la mesa esté altamente ocluido y la superficie visible del mismo sea tan pequeña que se haya descartado su estudio.

5.3.3. Posicionamiento del modelo 3D tipo “Mesa” en la escena

Una vez posicionado el tablero adecuadamente, el proceso final consiste en realizar un ajuste fino de posición del modelo 3D completo con la nube de puntos

de la escena. Este procedimiento se lleva a cabo, de nuevo, mediante un algoritmo ICP. La posición inicial del modelo que se pretende ajustar al escenario viene dada, en el plano XY por la pose del tablero calculada en el apartado anterior y en el eje Z, ajustando los apoyos de la mesa al plano de vóxeles correspondiente al suelo de la estancia. La Figura 5.10 muestra la posición final de una mesa de la escena.

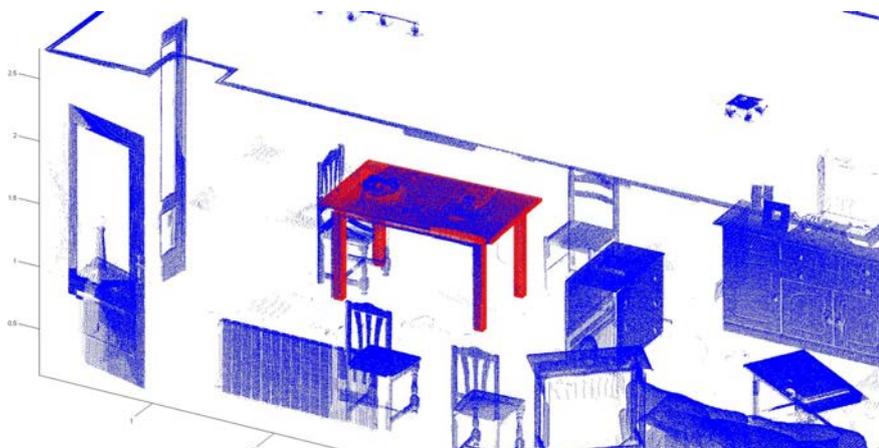


Figura 5.10: Modelo de mesa ajustado a la nube de puntos.

A modo de resumen de esta sección se muestra, en el Algoritmo 3, el pseudocódigo correspondiente al reconocimiento de objetos tipo “mesa”.

5.4. Reconocimiento de objetos tipo “Silla”

El segundo tipo de elementos no permanentes a identificar en la escena escaneada son las sillas. Para facilitar esta tarea, se cuenta con datos referentes al tipo de apoyo y a la distancia entre los puntos de apoyo de la silla. Esta información está escrita en las etiquetas RFID adheridas a cada elemento de este tipo.

La identificación se realiza mediante la búsqueda de un patrón de apoyo concreto. Estos patrones de apoyo son descritos a partir de la imagen proyectada de una franja de puntos adyacente al suelo.

Algoritmo 3 Segmentación de mesas

```

1: carga nube_puntos
2: para cada mesa hacer
3:    $h = altura\_tag(mesa)$ 
4:    $seccion = nube\_puntos|z \in (h - \varepsilon, h + \varepsilon)$ 
5:    $I \leftarrow binariza(seccion)$ 
6:   si  $area(segmentos_k(I)) > media(area(segmentos(I)))$  entonces
7:      $candidato \leftarrow segmentos_k(I)$ 
8:   fin si
9:   para cada candidato hacer
10:     $C \leftarrow scatter(candidato)$ 
11:     $M \leftarrow modelos(dimensiones\_tag(mesa))$ 
12:     $maxima\_curvatura(C)$ 
13:     $maxima\_curvatura(M)$ 
14:    para cada par_maxima_curvatura(C, M) hacer
15:       $pose\_M \leftarrow ICP(C, M)$ 
16:       $error\_ICP \leftarrow ICP(C, M)$ 
17:    fin para
18:    si  $error\_ICP_k = \min(error\_ICP)$  entonces
19:       $pose\_M\_final \leftarrow pose\_M_k$ 
20:    fin si
21:  fin para
22:  carga modelo_3D
23:   $modelo\_posicionado \leftarrow pose\_M\_final(modelo\_3D)$ 
24:   $nube\_puntos = nube\_puntos \setminus (nube\_puntos \cap modelo\_posicionado)$ 
25: fin para

```

De acuerdo con dicha imagen proyectada, los distintos tipos de silla que se pueden detectar en las nubes de puntos se han clasificado en dos grupos:

- *Patrones discretos*: En la imagen aparecen pequeñas regiones puntuales que son vértices de polígonos regulares (Figura 5.11a).
- *Patrones continuos*: En la imagen aparecen regiones con formas regulares y continuas (ver Figura 5.11b).

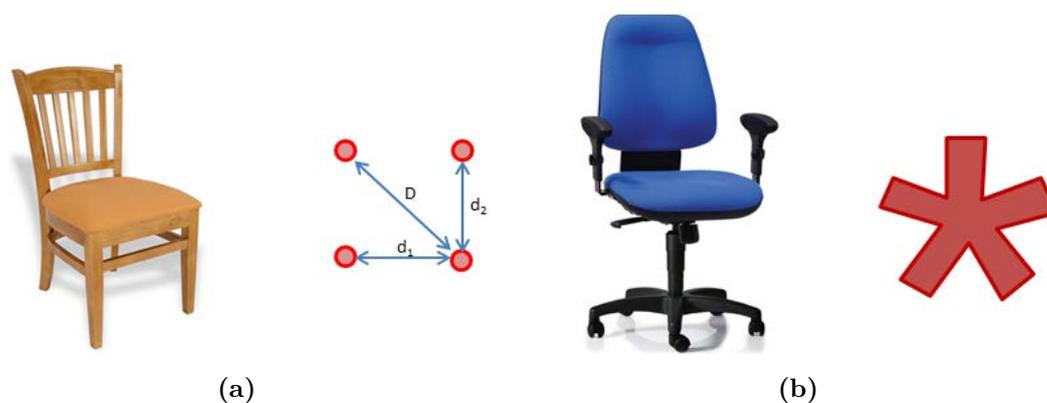


Figura 5.11: Ejemplos de patrones de patas de silla. a) Patrón discreto. b) Patrón continuo.

De la misma manera que en el caso de las mesas, la primera operación a realizar es la extracción de una franja de la nube de puntos (extraídos los puntos reconocidos de elementos estructurales y mesas) adyacente al suelo, para cada uno de los modelos de sillas presentes en la habitación. La Figura 5.12 muestra una vista cenital de una franja de puntos adyacente al suelo.

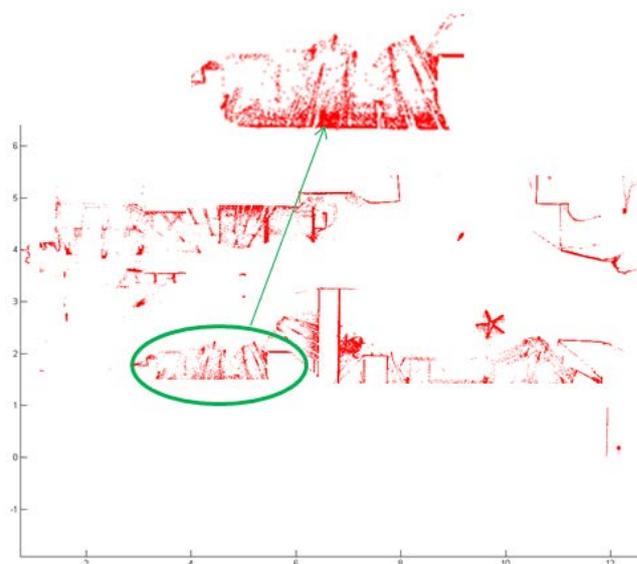


Figura 5.12: Sección de la nube de puntos adyacente al suelo.

Como se puede apreciar en la figura anterior, debido a los materiales de los que están hechos el suelo y las sillas, además de las oclusiones generadas por las

propias patas, se introducen datos erróneos en la nube de puntos (área marcada en verde y ampliada) y se dificulta la identificación de patrones. Por lo tanto, se debe realizar un procesamiento de datos delicado, que consta de varias etapas. En primer lugar se genera una imagen proyectada de los puntos 3D. Sobre esta imagen binaria se acometen los siguientes procesos:

- Filtrado para eliminar los puntos espurios y las zonas de área mínima.
- Etiquetado de regiones.
- Extracción de la densidad de las regiones, extrayendo los puntos 3D que se proyectan en cada región.
- Filtrado de regiones de baja densidad.

La Figura 5.13a se corresponde con una imagen binarizada del plano cenital de un entorno habitado. Las zonas en blanco son puntos detectados por el escáner y las zonas en negro son espacios sin ocupar. La Figura 5.13b muestra el resultado de eliminar los puntos aislados.

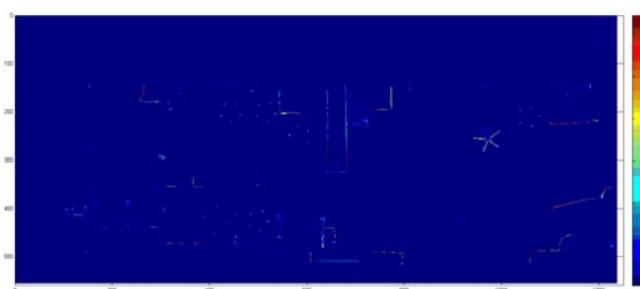
En la Figura 5.13c se muestra la densidad de puntos (mediante un código de color) para cada uno de los segmentos que aparecen en la Figura 5.13b. De esta manera, se eliminan aquellas zonas cuya densidad sea baja, con el fin de reducir puntos espurios y facilitar la detección de los patrones correspondientes a las sillas presentes en el escenario.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.13: Proceso de filtrado de la sección bajo estudio.

5.4.1. Patrones discretos

Los patrones de tipo discreto están constituidos por diferentes formas geométricas las cuales se distribuyen formando un polígono. Una silla de n apoyos, dará lugar a un patrón poligonal de n lados. Dicho polígono se define mediante uno o varios parámetros, normalmente distancias entre vértices, que son proporcionados por las etiquetas RFID. Por otra parte, la región del apoyo suele ser circular o cuadrada, por lo que se define mediante el diámetro de un círculo ϕ , o el lado de un cuadrado l .

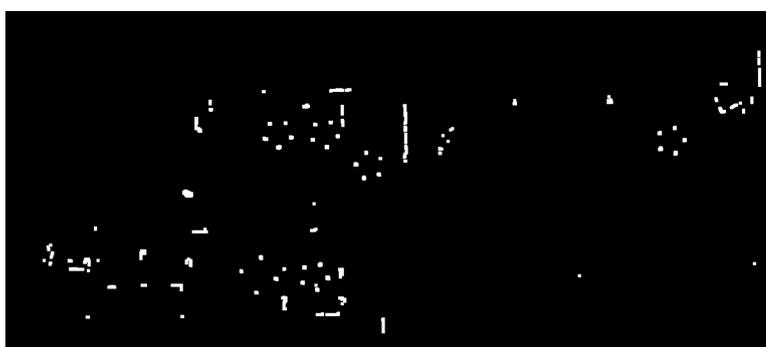
Para buscar un patrón de n lados en la imagen correspondiente a la vista cenital de una nube de puntos adyacente al suelo, se procede como sigue:

1. Se parte de un etiquetado de regiones compactas en la imagen.
2. Para cada región etiquetada (en adelante, segmento) se evalúan las distancias al resto de regiones de la imagen.

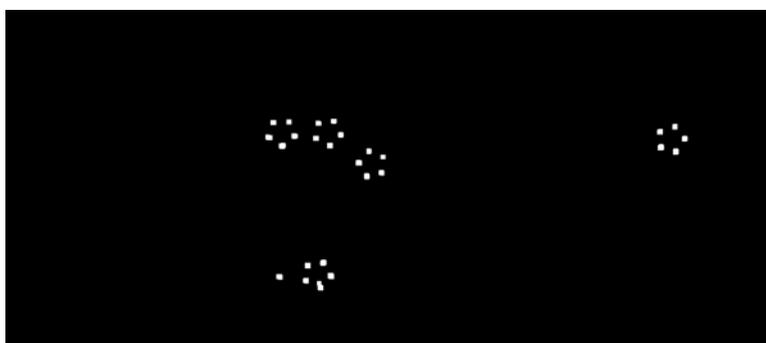
3. Se seleccionan los segmentos que cumplen las condiciones que definen el/los tipos de polígonos detectados por RFID. Es decir, aquellos que tienen segmentos a una distancia indicada por las etiquetas.
4. Se seleccionan los conjuntos de n segmentos que cumplen estas condiciones de forma simultánea.

A continuación, se muestran dos ejemplos de patrones discretos de silla identificados en un escenario bajo estudio. En la imagen de la Figura 5.14a se realiza una búsqueda de patrones formados por cuatro y cinco apoyos, de manera automática.

Ejemplo 1. Patrón discreto pentagonal



(a)



(b)



(c)

Figura 5.14: a) Segmentos extraídos de la binarización de la sección filtrada anteriormente. b) Segmentos candidatos a formar parte de una silla de patrón discreto pentagonal. c) Segmentos pertenecientes a cada silla.

Para el caso de sillas de patrón discreto pentagonal, se consideran los siguientes datos incluidos en las etiquetas: d , distancia entre dos apoyos adyacentes y ϕ , diámetro de los apoyos (ver Figura 5.15). Para el caso que ilustra la siguiente figura, $d = 25\text{cm}$, $\phi = 2,5\text{cm}$ y $D = \frac{1+\sqrt{5}}{2}d = 40,45\text{cm}$.

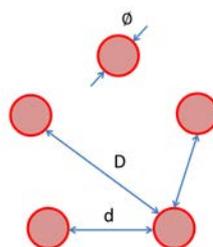


Figura 5.15: Modelo de patrón discreto pentagonal.

Estudiando las medidas indicadas en la Figura 5.15, se acota el número de segmentos candidatos a formar parte de una silla (ver Figura 5.14b). La información de las etiquetas indica el número de sillas de cada tipo presentes en el escenario. Por lo tanto, y en función de las distancias conocidas y calculadas anteriormente, se reconocen los grupos de apoyos tal como muestra la Figura 5.14c. Cada conjunto de segmentos se muestra en un color distinto para facilitar la visualización.

Ejemplo 2. Patrón discreto cuadrangular

Para la detección de sillas con este tipo de apoyos, el patrón que identifica la silla es como el que muestra la Figura 5.16, siendo los datos registrados en la etiqueta d_1 y d_2 . En la figura que se muestra a continuación $d_1 = 38cm$ y $d_2 = 41,5$, por lo que $D = \sqrt{d_1^2 + d_2^2} \simeq 56cm$.

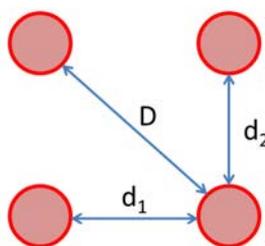


Figura 5.16: Modelo de patrón tipo 2.

De nuevo, a partir de estos datos, se acota el campo de estudio reduciendo a unos pocos segmentos los candidatos a formar parte las sillas (ver Figura 5.17a). En este caso, hay una sola silla con patrón discreto cuadrangular en el escenario. Los segmentos que la identifican están marcados en azul en la Figura 5.17b.

5.4.2. Patrones continuos

En las sillas de patrones de tipo continuo, se trata de identificar un único segmento con una forma concreta determinada por la geometría del apoyo de la silla.

Para encontrar el patrón en la imagen, se lleva a cabo un proceso de correlación cruzada (ver apartado 4.3.2.1) entre el modelo reconocido y las regiones etiquetadas en la imagen binaria.

Este estudio se realiza para cada tipo de patrón presente en el escenario (indicado por las etiquetas RFID) y para cada segmento presente en la imagen. Como en el caso de los patrones discretos, también se muestra a continuación un ejemplo de patrón continuo detectado en un escenario bajo estudio.

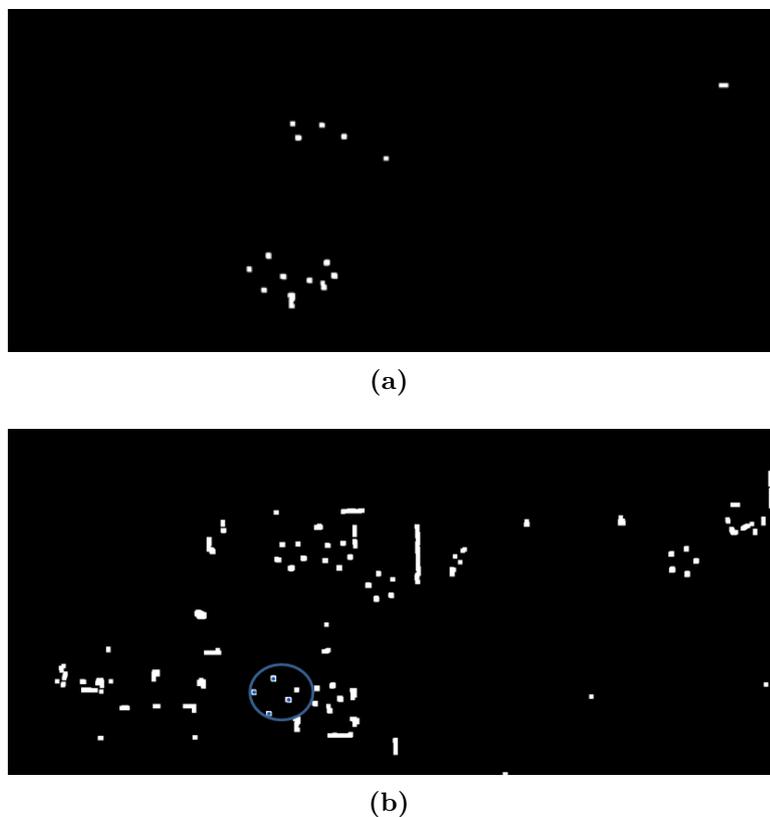


Figura 5.17: a) Segmentos candidatos a formar parte de una silla con patrón discreto cuadrangular. b) Segmentos pertenecientes a la silla identificada.

Ejemplo 3. Patrón continuo

Mientras que los patrones de las sillas de tipo discreto son formas geométricas compuestas por pequeños círculos, en este caso se trata de un patrón continuo con forma de asterisco (Figura 5.18a).

En este caso, se busca el patrón dentro de la imagen correspondiente a una franja de datos realizada a la altura indicada por las etiquetas (Figura 5.14a).

Mediante el estudio del coeficiente de correlación cruzada para el modelo de patrón y cada uno de los segmentos etiquetados, se obtiene la posición de la/las sillas de patrón continuo en la habitación, como se puede apreciar en la Figura 5.18b.

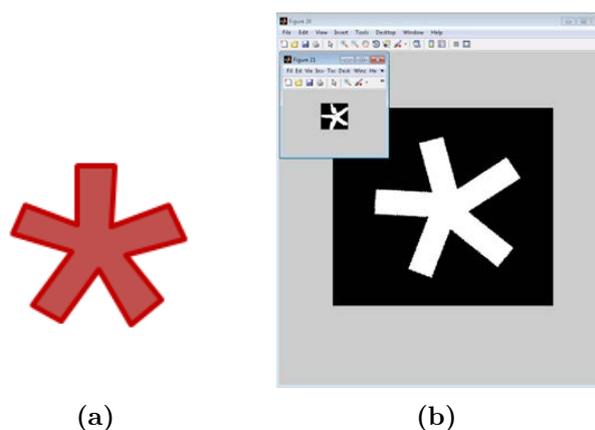


Figura 5.18: a) Modelo de patrón tipo continuo. b) Ajuste del modelo al segmento de tipo continuo.

Finalmente, en la Figura 5.19, se muestra el conjunto de sillas identificadas en el escenario.

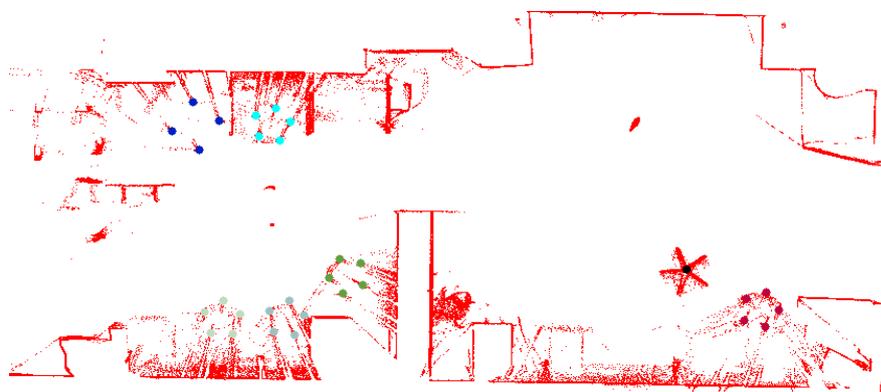


Figura 5.19: Conjunto de sillas identificadas en la habitación.

5.4.3. Ajuste del modelo 3D de las sillas a la nube de puntos

Una vez detectadas las distintas sillas y los apoyos de las mismas en el escenario, el siguiente proceso consiste en posicionar los modelos 3D correspondientes a cada una de ellas. Este procedimiento es distinto al posicionamiento de las

mesas, ya que la posición de los apoyos no indica de forma unívoca la orientación de la silla. Puede haber varias orientaciones posibles del modelo que se ajusten a la posición de los apoyos, como muestra la Figura 5.20. Por tanto, el algoritmo ICP (entre el modelo 3D y la nube de puntos) para realizar el ajuste fino del modelo se lanzará desde cada una de estas posiciones iniciales.

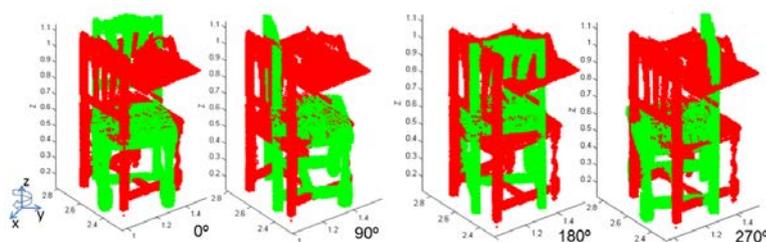


Figura 5.20: Posiciones iniciales del modelo (en verde) para los procesos de ajuste.

De este modo, el respaldo del modelo se ajustará correctamente a la nube de puntos para alguna de las posiciones iniciales.

De los resultados obtenidos, se elige aquél en el cual el error de ajuste es mínimo. En la Figura 5.21 aparecen distintos tipos de silla posicionados en un escenario, correspondiente a un salón de una vivienda.

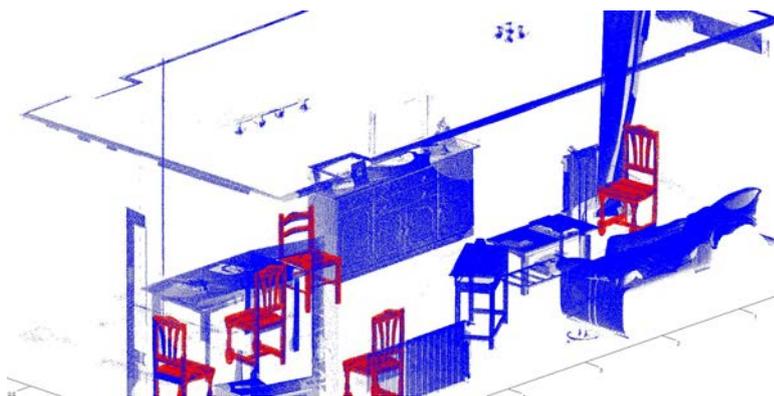


Figura 5.21: Modelos ajustados a una nube de puntos.

A modo de síntesis, en el Algoritmo 4 se presentan los diferentes procesos llevados a cabo para la identificación y posicionamiento de sillas en una nube de puntos.

Algoritmo 4 Segmentación de sillas

```

1: carga nube_puntos
2: para cada silla hacer
3:    $h = altura\_tag(silla)$ 
4:    $seccion = nube\_puntos|z \in (h - \varepsilon, h + \varepsilon)$ 
5:    $I \leftarrow binariza(seccion)$ 
6:    $segmentos = segmentos(I) > media(segmentos(I))$ 
7:   si patrón es discreto entonces
8:     para cada segmento hacer
9:        $d_j = distancias(segmento_i, segmento_j), i \neq j$ 
10:    fin para
11:    si  $n$  segmentos cumplen  $d_k < distancia\_patron$  entonces
12:       $candidato \leftarrow n$  segmentos
13:       $puntos\_entorno \leftarrow candidato$ 
14:    fin si
15:  fin si
16:  si patrón es continuo entonces
17:    para cada segmento hacer
18:       $correlacion\_cruzada(modelo\_patron, segmento)$ 
19:    fin para
20:    si  $coef\_correlacion_k = max(coef\_correlacion)$  entonces
21:       $candidato \leftarrow segmento_k$ 
22:       $puntos\_entorno \leftarrow candidato$ 
23:    fin si
24:  fin si
25:  carga modelo_3D
26:   $modelo\_posicionado \leftarrow ICP(modelo\_3D, puntos\_entorno)$ 
27:   $nube\_puntos = nube\_puntos \setminus (nube\_puntos \cap modelo\_posicionado)$ 
28: fin para

```

5.5. Reconocimiento de objetos tipo “Armario”

A continuación, se procede a reconocer y ubicar los objetos de tipo armario en la nube de puntos. Los armarios a identificar son cerrados con puertas opacas,

por lo que el problema se reduce a buscar paralelepípedos de unas dimensiones determinadas en la nube de puntos. Dichas medidas (alto, ancho, profundo) son las incluidas en las etiquetas RFID. Más específicamente, los armarios son reconocidos a través de sus planos de puntos verticales, debido a que en muchas ocasiones la parte superior de un armario no puede ser escaneada. Este proceso se lleva a cabo una vez se han identificado y segmentado la mayoría de elementos presentes en la nube de puntos (elementos estructurales, mesas y sillas).

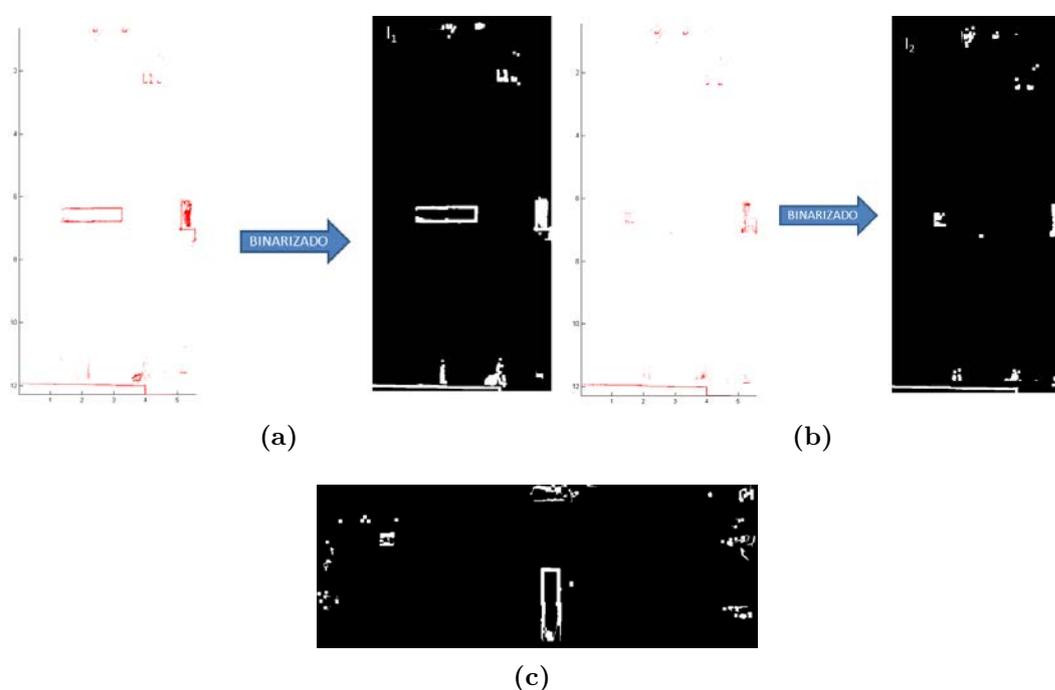


Figura 5.22: Proceso de obtención de las regiones donde se ubican los armarios. a) Sección por encima de la altura del armario. b) Sección por debajo de la altura del armario y c) Resta de imágenes binarias.

El primer paso consiste en evaluar dos imágenes cenitales con el fin de determinar las áreas donde se ubican los armarios. Como se ha mencionado anteriormente, se cuenta con el valor de la altura de los armarios presentes en el escenario. Por tanto, se toman dos secciones de los datos por encima y debajo de la altura del armario. Así, se generan dos imágenes binarias y se realiza la resta de ambas para aislar la región que delimita las paredes del armario.

En la Figura 5.22c, el segmento que contiene un mayor número de puntos 3D delimita la región donde está situado el armario. Después de realizar el cambio de coordenadas oportuno imagen-datos 3D, se estudian los puntos situados en el entorno de la región segmentada (ver Figura 5.23).

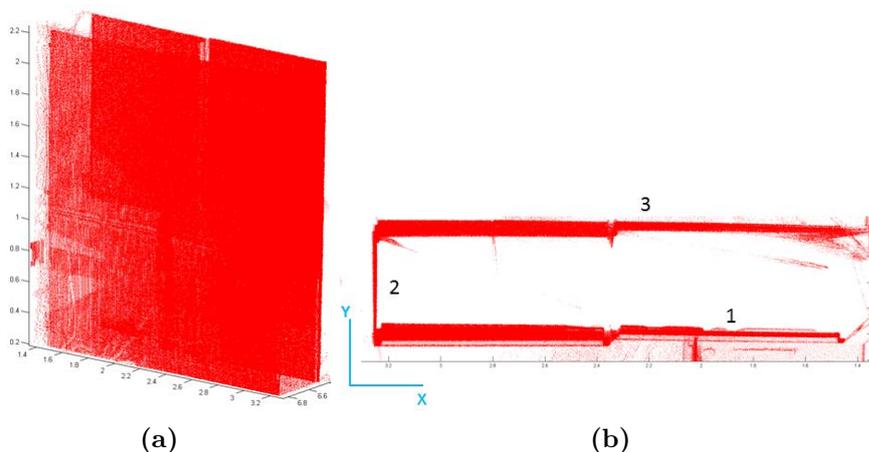
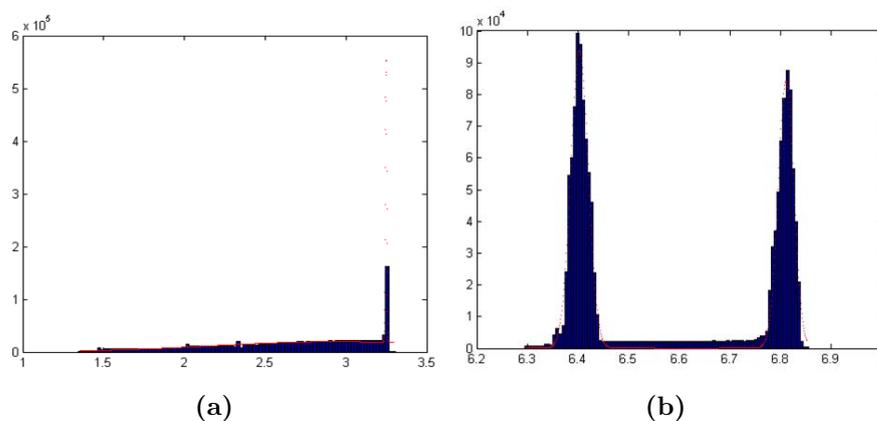


Figura 5.23: Nube de puntos del entorno de la región segmentada. a) Vista en perspectiva. b) Vista cenital.

Mediante histogramas de la vista cenital de los datos segmentados (Figura 5.23a), se identifican las paredes verticales que conforman el armario junto con sus direcciones normales. En el ejemplo mostrado se puede deducir, de los histogramas de la Figura 5.24, la existencia de tres paredes (que corresponden a las numeradas en la Figura 5.23b).



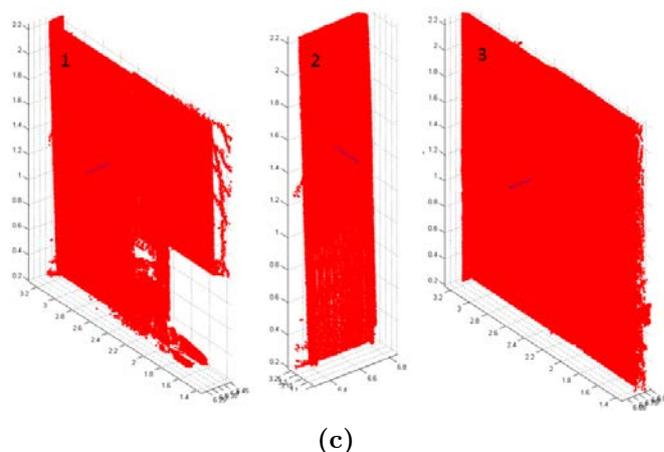


Figura 5.24: Histogramas según los ejes X (a) e Y (b) de un plano cenital de la nube de puntos del entorno del armario. c) Paredes del armario segmentadas y normales de cada conjunto de puntos.

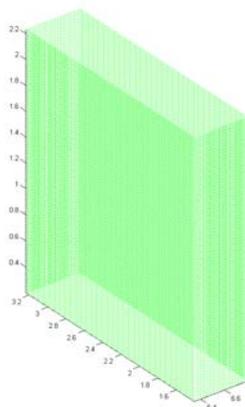


Figura 5.25: Modelo del armario identificado a partir de una etiqueta RFID.

Una vez definidos los dos conjuntos de puntos, correspondientes al armario escaneado y al modelo real, el proceso final consiste en ajustar el modelo real reconocido (Figura 5.25) a la nube de puntos de la habitación. Para ello, se ejecuta un algoritmo ICP con el fin de minimizar la distancia entre los dos conjuntos y obtener la posición del armario en el entorno con la mayor precisión posible.

Con el fin de realizar un preajuste, antes de ejecutar el algoritmo ICP sobre los puntos 3D, se llevan a cabo los siguientes procesos (Figura 5.26):

1. Se toman como referencia los centroides de ambos armarios (modelo y escaneado) y se traslada el modelo al sensado (vector \underline{T}).
2. Se gira el modelo un ángulo α , haciendo coincidir las normales de las paredes del modelo n_m con sus correspondientes en la nube de puntos n_d . Este ángulo se calcula como un promedio de los ángulos formados por cada pared sensada con su equivalente en el modelo.

$$\alpha = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (5.2)$$

con $n = 2$ por ser las paredes de un armario paralelas dos a dos.

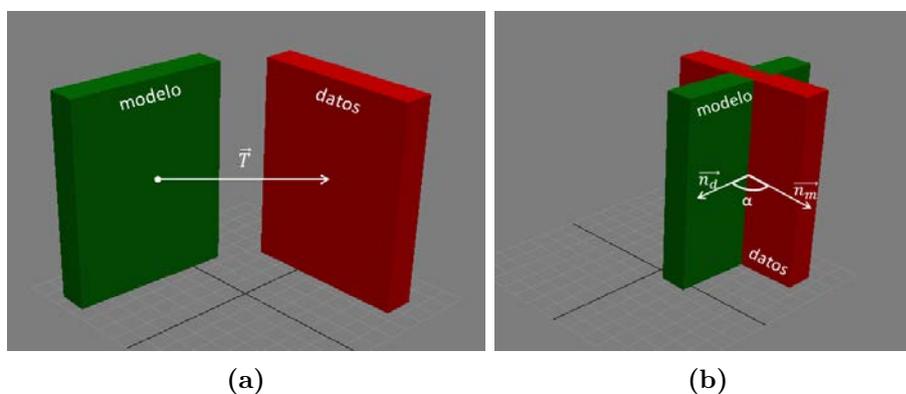


Figura 5.26: a) Traslación del modelo virtual. b) Rotación del modelo.

Desde esta disposición de datos, se ejecuta el ICP para ajustar el modelo a la nube de puntos segmentada. El resultado obtenido, se puede apreciar en la Figura 5.27.

Finalmente, y del mismo modo que en los casos anteriores, en el Algoritmo 5 se muestran las diferentes operaciones realizadas a la hora de identificar y segmentar los elementos no permanentes de tipo “armario”.

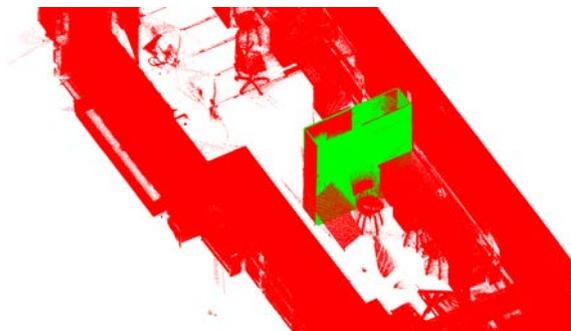


Figura 5.27: Ajuste de las dos nubes de puntos.

Algoritmo 5 Segmentación de armarios

```

1: para cada armario hacer
2:    $h = altura\_tag(armario)$ 
3:    $seccion\_1 = nube\_puntos|z = h + \varepsilon$ 
4:    $seccion\_2 = nube\_puntos|z = h - \varepsilon$ 
5:    $I \leftarrow binariza(seccion\_1)$ 
6:    $I' \leftarrow binariza(seccion\_2)$ 
7:    $R = I' - I$ 
8:   para cada  $segmento(I)$  hacer
9:      $num\_puntos = num\_puntos\_segmento$ 
10:  fin para
11:  si  $num\_puntos_k = max(num\_puntos)$  entonces
12:     $candidato\_armario \leftarrow segmento_k$ 
13:     $puntos\_entorno \leftarrow candidato$ 
14:  fin si
15:  carga  $modelo\_3D$ 
16:   $T = dist\_centroides(modelo\_3D, candidato\_armario)$ 
17:   $\alpha = angulo(cara_k(modelo\_3D), cara_k(candidato\_armario))$ 
18:   $R(\alpha) \leftarrow \alpha$ 
19:   $segmento\_alineado = T \cdot R(\alpha) \cdot modelo\_3D$ 
20:   $modelo\_posicionado \leftarrow ICP(segmento\_alineado, nube\_puntos)$ 
21:   $nube\_puntos = nube\_puntos \setminus (nube\_puntos \cap modelo\_posicionado)$ 
22: fin para

```

5.6. Reconocimiento de objetos tipo “Papelera”

Los últimos objetos no permanentes que se identifican y posicionan en los escenarios sensados son las papeleras. Llegado este punto, ya se ha eliminado de la nube de puntos la información correspondiente a los elementos estructurales y los datos 3D de mesas, sillas y armarios.

Para llevar a cabo esta operación, se procede de un modo similar al ilustrado en el apartado 4.5, correspondiente al reconocimiento de columnas.

Las papeleras son elementos de sección invariable, cuyo eje longitudinal es perpendicular al plano del suelo. Por lo tanto, los parámetros que determinan estos objetos son las dimensiones de su sección y su altura. Esta información está contenida en las etiquetas RFID y facilita su identificación en la nube de puntos.

A partir del dato correspondiente a la altura de cada papelerera presente en el entorno, se selecciona una franja de datos 3D del escenario sensado por encima de este valor de altura y otra por debajo. Estas dos franjas permiten generar imágenes binarias, las cuales se restan con el fin de delimitar la zona que ocupa la papelerera.

En la imagen resultado de la resta de imágenes, se selecciona el segmento (o segmentos) cuya *bounding box* se ajusta al tamaño de la sección de la papelerera (o papeleras) cuya altura es indicada por una etiqueta RFID.

La proyección sobre el plano cenital de los puntos 3D contenidos en el segmento son evaluados con el fin de ajustar los mismos a una circunferencia o un rectángulo siguiendo el proceso mostrado en los apartados 4.5.1 y 4.5.2. Si los parámetros que definen la sección son iguales a los extraídos de las etiquetas, dicho conjunto de puntos es etiquetado como una papelerera y es ajustado mediante un cilindro o un paralelepípedo.

La Figura 5.28 muestra, con un ejemplo, el proceso llevado a cabo para la identificación y posicionamiento de una papelerera en un escenario sensado.

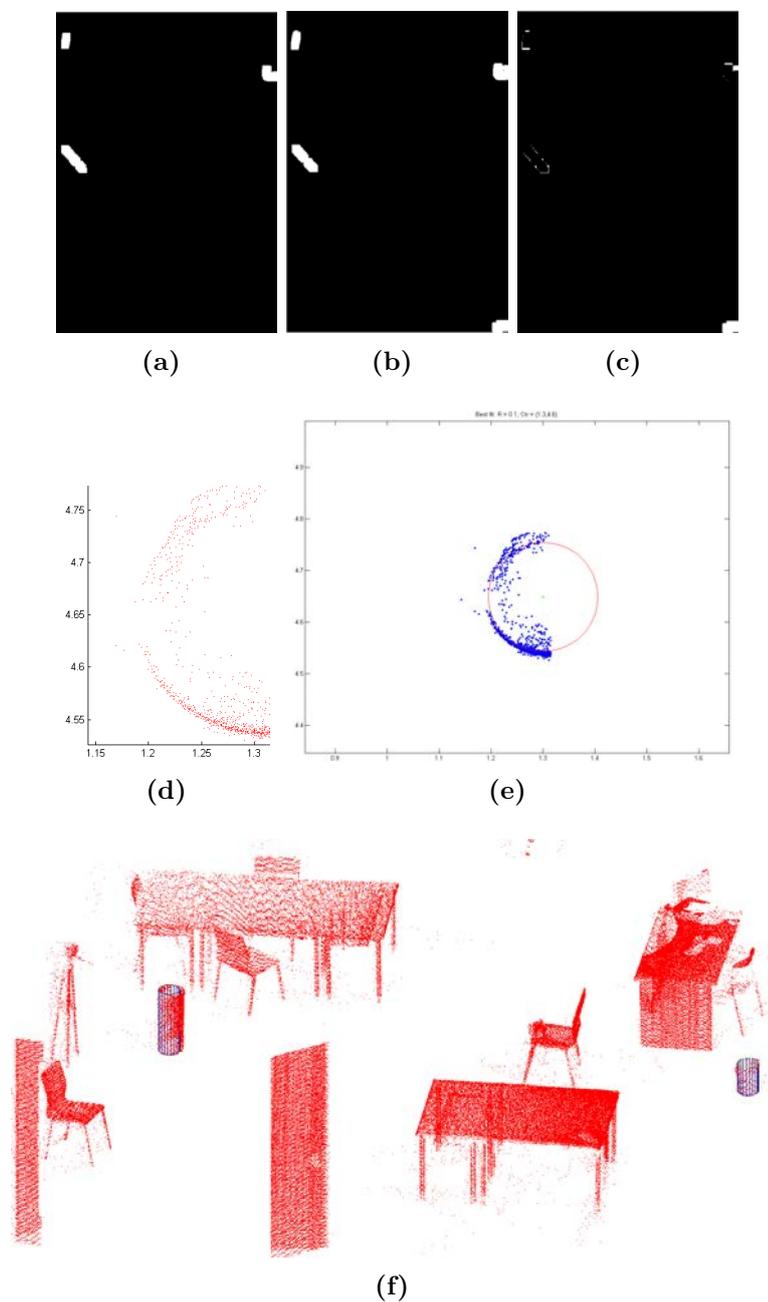


Figura 5.28: Proceso de posicionamiento de un objeto de tipo “papelera”. a) Imagen binaria de una sección por encima de la altura de la papelera. b) Imagen binaria de una sección bajo dicha altura. c) Resta de las imágenes. d) Datos 3D del segmento. e) Ajuste de los datos a un perfil circular. f) Papeleras identificadas y posicionadas en un entorno.

5.7. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se ha presentado la combinación de tecnologías desarrollada para identificar y posicionar los elementos básicos no permanentes de un escenario interior habitado.

En primer lugar, se explica cómo se gestiona la información almacenada en las etiquetas, que servirá de ayuda para agilizar el proceso de identificación de objetos en una nube de puntos. En la segunda sección se desarrollan las fases de codificación, escritura, lectura y decodificación.

Tras obtener los datos de las etiquetas, estos se integran en el algoritmo de reconocimiento y cálculo de pose de los objetos. A lo largo de diferentes secciones, se presentan los procedimientos seguidos a la hora de reconocer los principales tipos de objetos no permanentes: mesas, sillas, armarios y papeleras.

Una vez desarrollados los algoritmos destinados a identificar y segmentar tanto los elementos estructurales como los no permanentes de un interior bajo estudio, se han llevado a cabo una serie de experimentos que permiten probar su eficacia. Los resultados obtenidos en estas experiencias se muestran en el siguiente capítulo.

6 |

Resultados experimentales

6.1. Introducción

6.1.1. Entornos de actuación

Los algoritmos desarrollados en esta tesis y explicados en capítulos anteriores han sido probados en diferentes entornos interiores habitados. Se han buscado escenarios realistas, conteniendo diferentes elementos constructivos, componentes no permanentes diversos y con plantas de geometría compleja.

Se han elegido habitaciones de diferente tamaño y destinadas a fines muy dispares. En primer lugar, se ha escaneado el Laboratorio de Realidad Virtual del *3D Visual Computing and Robotics Lab*, ubicado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Castilla-La Mancha, en Ciudad Real.

Dicho laboratorio cuenta con diferentes tipos de sillas, mesas y armarios. Sobre las mesas, como puede apreciarse en la Figura 6.1, hay computadores y otros elementos que dificultan su identificación. A estos objetos hay que sumar otros dispositivos (como un panel de proyección) que ocluyen los muros que deben ser identificados.

El segundo entorno elegido es el salón de una vivienda privada. Esta habitación tiene una planta más compleja que la del laboratorio, con más paredes y de



Figura 6.1: Imágenes del laboratorio bajo estudio.

menor tamaño, tal y como se puede apreciar en la Figura 6.2. Los elementos no permanentes son muy diferentes de los presentes en el laboratorio. En este caso, las mesas no son de trabajo, sino de comedor o de café y los armarios son de menor tamaño. Al igual que en el caso anterior, diversos elementos ocluyen parcialmente la escena.



Figura 6.2: Imágenes del salón bajo estudio.

Un tercer entorno de actuación se ha configurado en diferentes aulas y pasillos del Aulario Polivalente de la Facultad de Medicina de la UCLM en Ciudad Real. En este caso se dispone de cinco aulas con mesas, sillas y papeleras de diversos tipos, así como de los pasillos que comunican dichas habitaciones. La Figura 6.3 muestra los diferentes espacios estudiados.

Los resultados de los estudios realizados se muestran en los apartados 6.2, 6.3 y 6.4.



Figura 6.3: Imágenes de los entornos bajo estudio en el aula.

6.1.2. Tecnologías empleadas

En la adquisición de información 3D del Laboratorio de Realidad Virtual (*Entorno 1*) se ha utilizado el escáner Riegl VZ-400, cuyas características son

descritas en el apartado 3.1.1.1. La toma de datos del *Entorno 2* se ha llevado a cabo mediante un escáner láser Faro Photon 80 (ver subsección 3.1.2.1).

Para el registro de la información contenida en las etiquetas RFID se ha empleado en los distintos casos un sensor OBID LRU 3500 de la compañía alemana FEIG, como el descrito en el apartado 3.2.1.

En el caso del *Entorno 3*, el escáner Riegl y el lector RFID se han instalado en un robot móvil, como se explica en la sección 6.4.

6.1.3. Adquisición de la información

Como se menciona en apartados anteriores, los sensores son posicionados en distintos puntos estratégicos del escenario bajo estudio con el fin de obtener la mayor cantidad de datos posible. La información 3D procedente del escáner láser y los datos obtenidos de las etiquetas RFID (en color morado en el diagrama de la Figura 6.4) son las entradas a los algoritmos que permiten identificar y posicionar los elementos básicos del escenario. Estos algoritmos han sido descritos en los capítulos 4 y 5.

Con el propósito de obtener una visión general del proceso llevado a cabo en este trabajo, en la Figura 6.4 se muestra un diagrama de flujo del mismo. Este diagrama ilustra los diferentes métodos ejecutados durante el proceso de adquisición de datos por medio de los sensores mencionados anteriormente.

En cada uno de los puntos en los que se posicionan los sensores, se lleva a cabo la lectura de las etiquetas RFID que están en el radio de alcance del sensor. La información contenida en dichas etiquetas es decodificada y almacenada en una base de datos. Estos datos son utilizados posteriormente en los algoritmos de identificación y posicionamiento de elementos no permanentes en el escenario. De forma simultánea, para cada posición estratégica, el escáner láser adquiere información 3D del entorno.

Tras cubrir completamente el área bajo estudio y después de llevar a cabo el alineamiento de los datos 3D, se ejecutan los algoritmos de identificación y posicionamiento de elementos básicos de la escena.

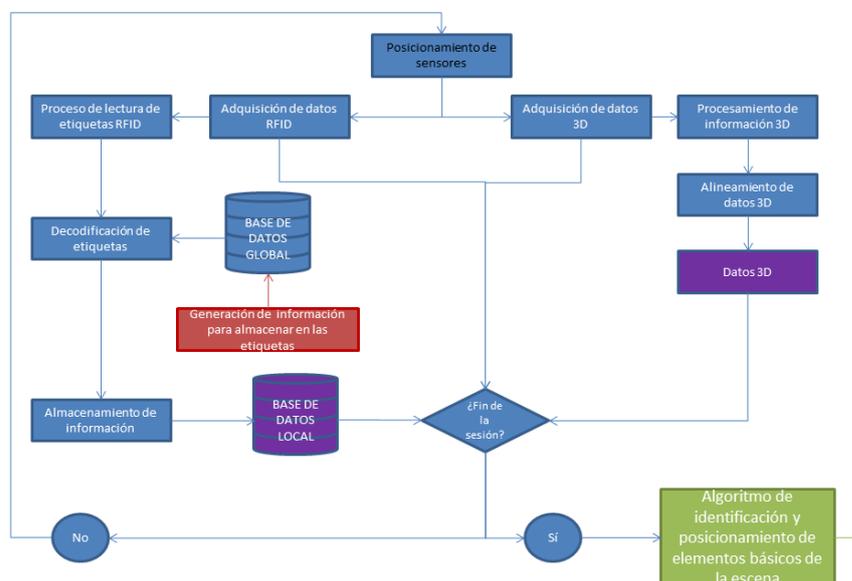


Figura 6.4: Diagrama de bloques del proceso de adquisición de datos.

6.1.4. Registro de nubes de puntos

Como se menciona en la Sección 3.1, un láser escáner proporciona información 3D de un escenario. Mediante el procesamiento de dicha información, se pueden identificar y segmentar diferentes componentes que forman parte de la escena. Sin embargo, la disposición de algunos de esos elementos, ya sean estructurales o parte del mobiliario, crean oclusiones haciendo que determinadas regiones del entorno bajo estudio no sean sensadas por el escáner (ver Figura 6.5). Es por ello que deben llevarse a cabo varias tomas de datos o escaneos de la escena desde diferentes posiciones, obteniendo la mayor cantidad de información posible.

Gracias a la experiencia adquirida, el operario del escáner puede determinar el número de tomas necesarias para obtener datos de la totalidad del entorno. El número de escaneos está determinado, normalmente, por la geometría de la estancia y la disposición de distintos elementos que ocluyen parte de la escena.

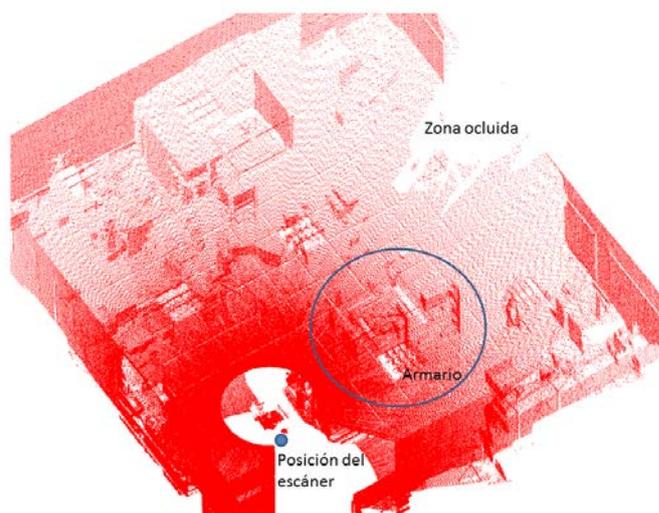


Figura 6.5: Ejemplo de escenario con oclusiones.

6.1.4.1. Correspondencia de reflectores

Tras obtener la información 3D del escenario desde diferentes posiciones del escáner (Figura 6.6), se acomete el alineamiento de datos bajo un mismo sistema de coordenadas universal (UCS, del inglés *Universal Coordinate System*), obteniendo una nube de puntos densa de la estancia.



Figura 6.6: Diversos escaneos de la misma habitación.

El sistema de referencia del primer escaneo se toma como UCS. Para llevar a cabo el proceso de registro, debe haber un subconjunto de puntos comunes a dos tomas consecutivas, cuyas coordenadas son conocidas en su propio sistema de referencia.

Estos puntos de referencia pueden ser elegidos por el usuario, ya sea buscando manualmente puntos característicos en la nube (un vértice de una estantería, un objeto sobre una mesa, un punto determinado en un cuadro colgado en la pared, etc.) o bien determinados de una forma automática.

Además de las coordenadas 3D de cada punto del escenario, proporcionadas por el escáner, y el color, adquirido mediante una cámara réflex montada sobre el mismo, el escáner facilita el valor de reflectancia para cada punto sensado. Esta variable establece una relación entre la amplitud del campo electromagnético reflejado respecto a la amplitud del campo incidente. La ubicación en el escenario de objetos con un alto índice de reflectancia permite identificar automáticamente determinadas regiones de referencia y realizar transformaciones entre las distintas nubes de puntos sensadas. En este caso se utilizan cilindros reflectantes de 10 centímetros de altura.

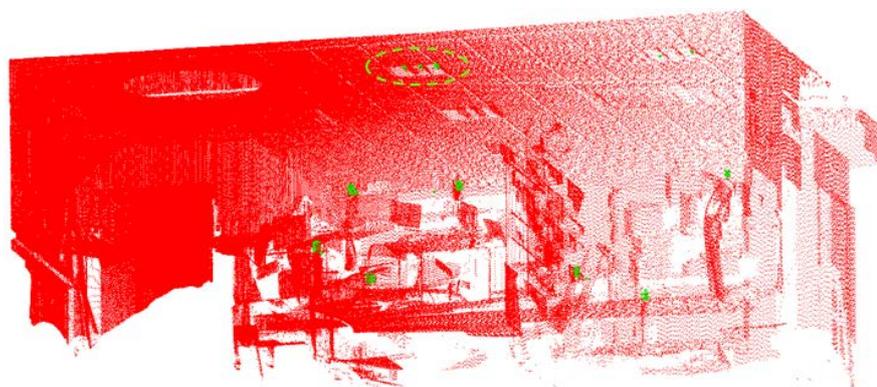
En la Figura 6.7a se puede observar cómo los objetos marcados con un círculo reflejan más la luz que el resto de elementos al ser iluminados de forma directa por el flash de la cámara. En la Figura 6.7b se muestran, en verde, las zonas con alto nivel de reflectancia detectadas en una nube de puntos. Muchas de ellas se corresponden con los elementos destinados a servir como referencia. Estas zonas son segmentadas, formando diversos conjuntos de puntos cuya separación es inferior al espacio delimitado por un reflector.

Como se aprecia, hay determinadas regiones con alta reflectancia que no se corresponden con cilindros. Estas zonas, como las rodeadas con línea discontinua en la figura anterior, pueden ser parte de elementos metálicos o superficies muy pulidas. Se trata de falsos positivos que deben ser filtrados.

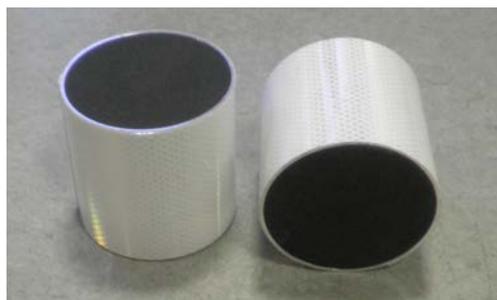
Para llevar a cabo el registro de dos nubes de puntos captadas por el escáner desde dos posiciones, se deben identificar al menos tres pares de puntos correspondientes. Cuantos más pares de puntos correspondientes haya, el ajuste será mejor. Para establecer esta relación biunívoca, se estudian las combinaciones de tres elementos en cada uno de los dos conjuntos de puntos de referencia y para uno de ellos se permutan las combinaciones, al ser vinculante el orden en el que se seleccionen los puntos.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.7: a) Localización de reflectores en un escenario. b) Zonas de alta reflectancia (en verde) en una nube de puntos. c) Reflectores cilíndricos empleados para el registro de tomas.

Con objeto de reducir el tiempo de cómputo, se hace una primera aproximación de esta correspondencia en 2D, como muestra el esquema de la Figura 6.8. Para ello, se seleccionan como puntos característicos las coordenadas (x, y) (que corresponden a las coordenadas del suelo) de los centroides de las diferentes regiones con alta reflectividad segmentadas anteriormente.

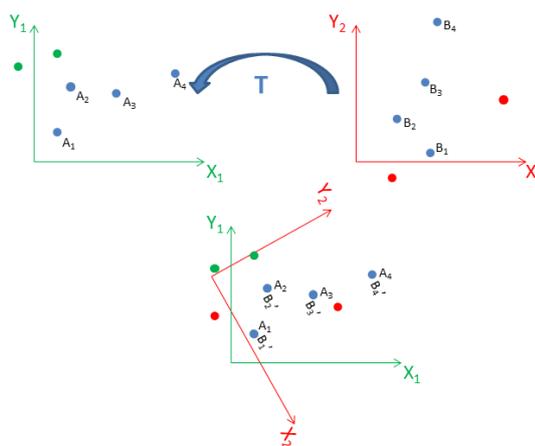


Figura 6.8: Transformación realizada sobre un conjunto de puntos de referencia.

El cálculo de esta correspondencia entre conjuntos de puntos 2D se lleva a cabo como sigue:

- Se seleccionan cuatro elementos, de forma ordenada, de cada uno de los conjuntos de puntos característicos.
- Para estas dos permutaciones se calcula una transformación T , como se muestra en el apartado 6.1.4.2.
- Una vez realizada esta operación, se calcula la distancia entre cada par de centroides correspondientes.
- Si las distancias para los cuatro pares de centroides son menores a la diagonal del reflector (ver Figura 6.9), las regiones de alta reflectancia cuyos centroides se corresponden con estas dos permutaciones, P_1 y P_2 , se emplean para calcular el ajuste 3D.

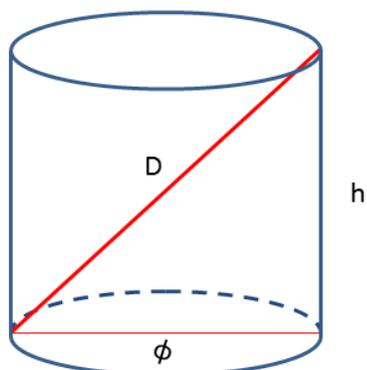


Figura 6.9: Parámetros que definen el reflector cilíndrico.

A continuación, cada una de las zonas de alta reflectancia vinculadas a los conjuntos P_1 y P_2 seleccionados en el proceso anterior es ajustada a un cilindro, como se muestra en la Figura 6.10.

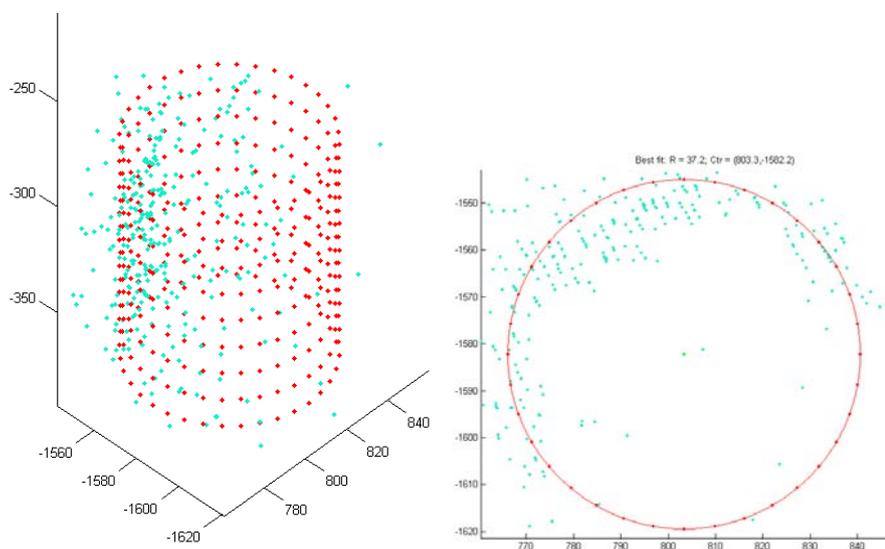


Figura 6.10: Ajuste de un conjunto de puntos de alta reflectancia a un cilindro.

Por tanto, de cada par de conjuntos seleccionados, P_1 y P_2 , se obtienen dos pares de cuatro cilindros que se corresponden con los cilindros reflectores ubicados en la escena escaneada, como se muestra en la Figura 6.11.

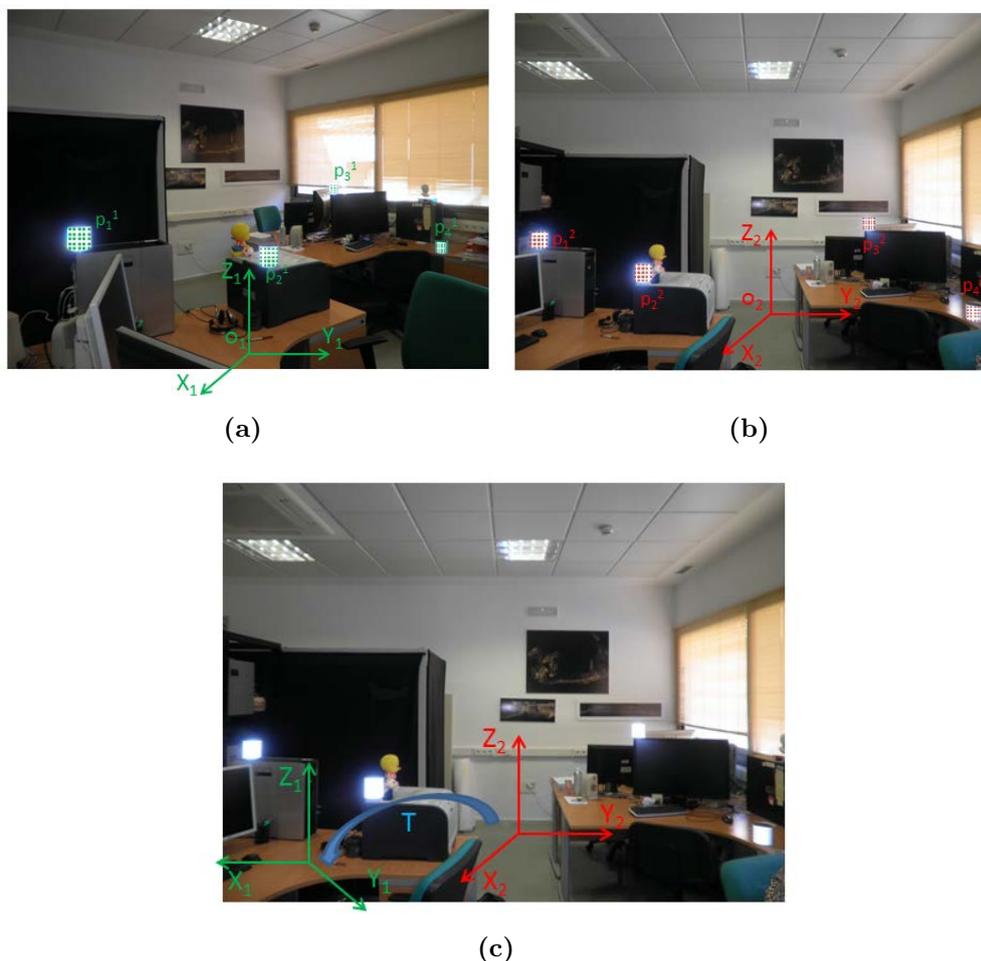


Figura 6.11: a) Conjunto de referencia P_1 . b) Conjunto de referencia P_2 . c) Registro de P_1 y P_2 bajo un mismo UCS.

Los cilindros a los que se ajustan las zonas de alta reflectancia son representados por conjuntos de puntos generados sintéticamente siempre en el mismo orden (ver Figura 6.12), por lo que existe correspondencia entre los puntos de cada par de reflectores. En otras palabras, son correspondientes mediante una simple traslación. Por tanto, ahora existe una correspondencia cierta entre los puntos de cada par de cilindros sintéticos y puede obtenerse una transformación más precisa, como se muestra en la siguiente sección.

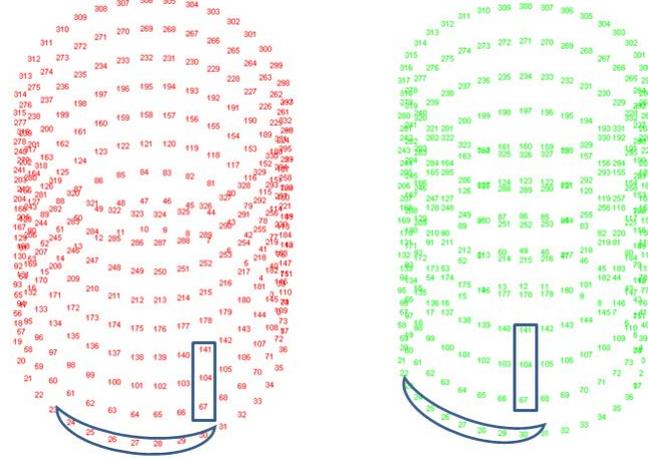


Figura 6.12: Orden en el cual se generan los cilindros ajustados.

6.1.4.2. Transformación rígida de dos nubes de puntos correspondientes

En este apartado se muestra cómo se lleva a cabo un primer ajuste entre dos nubes de puntos (las correspondientes al conjunto de cilindros sintéticos citados en la sección anterior). En primer lugar, se calculan los centroides de ambas nubes de puntos P_1 y P_2 .

$$c_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i^1 \quad (6.1)$$

$$c_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i^2 \quad (6.2)$$

A continuación, se traslada cada una de las nubes de puntos a su origen O_i con el objetivo de encontrar la matriz de rotación óptima R por medio de la Descomposición en Valores Singulares (SVD, de sus siglas en inglés) (62).

$$A = USV^T \quad (6.3)$$

$$[U, S, V] = SVD(A) \quad (6.4)$$

$$cov = \sum_{i=1}^n (P_i^1 - c_1)(P_i^2 - c_2)^T \quad (6.5)$$

$$[U, S, V] = SVD(cov) \quad (6.6)$$

$$R = VU^T \quad (6.7)$$

Se combina la matriz de rotación calculada R con las translaciones t_1 y t_2 para obtener la matriz de transformación T .

$$T = t_1 R^* t_2 \quad (6.8)$$

donde

$$t_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & c_{1x} \\ 0 & 1 & 0 & c_{1y} \\ 0 & 0 & 1 & c_{1z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$t_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_{2x} \\ 0 & 1 & 0 & -c_{2y} \\ 0 & 0 & 1 & -c_{2z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R^* = \begin{pmatrix} & & & 0 \\ & R & & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Finalmente, se obtienen dos nubes de puntos P_1 y P_2' bajo el mismo UCS.

$$P_2' = TP_2 \quad (6.9)$$

Esta transformación rígida proporciona una primera aproximación al alineamiento entre dos tomas.

Del apartado anterior se obtienen n conjuntos de cilindros correspondientes, por lo que esta transformación rígida se realiza n veces. Aquélla cuyo error sea menor es la empleada para llevar a cabo el ajuste fino que se presenta a continuación.

6.1.4.3. Ajuste fino entre nubes de puntos de la escena

El ajuste llevado a cabo en el apartado anterior se produce únicamente entre los puntos correspondientes a los reflectores identificados. Esta transformación alinea las diferentes tomas de una forma aproximada, como muestra la Figura 6.13, pero no genera un ajuste con la precisión deseada. Sin embargo, este resultado sirve como punto de partida para ejecutar un algoritmo basado en ICP (14) entre cada par de escaneos consecutivos, que permita generar un modelo preciso de la estancia sensada (ver Figura 6.14).

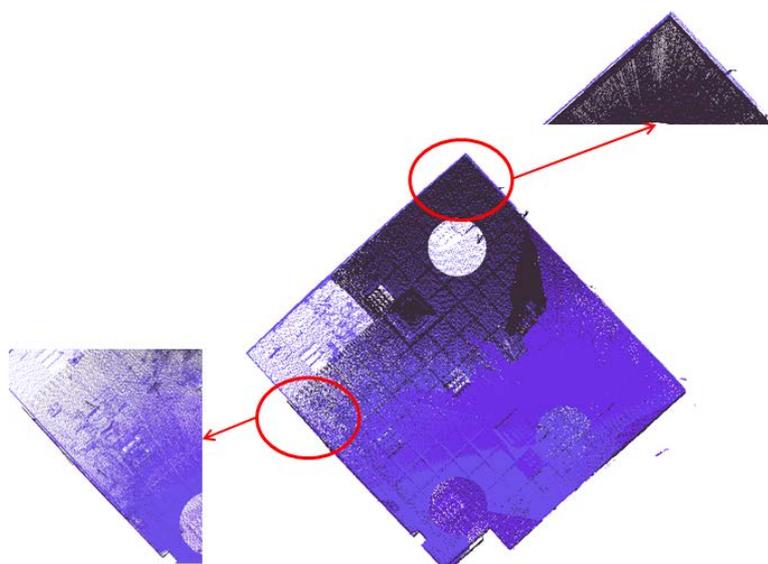


Figura 6.13: Transformación aproximada entre dos nubes de puntos.

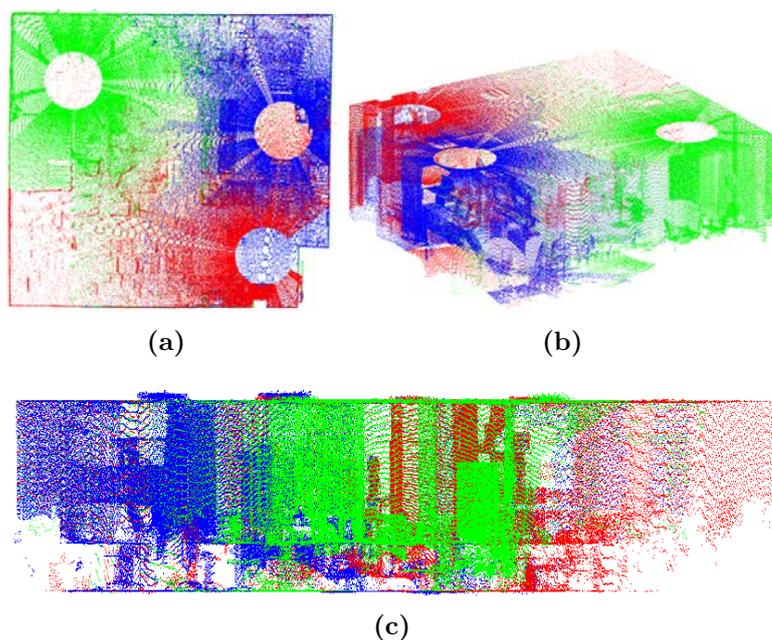


Figura 6.14: Distintas vistas de un registro preciso de tres nubes de puntos de una escena interior.

6.1.5. Creación de una base de datos de modelos 3D de objetos no permanentes

Como se ha comentado en el Capítulo 5, una vez identificados determinados objetos no permanentes en una nube de puntos, debe calcularse con precisión la posición y orientación de los mismos. Para ello se dispone de una base de datos de modelos 3D, formada por unos 300 objetos distintos entre sillas, mesas y armarios, que permiten determinar de una forma más precisa qué objetos son los que componen el escenario.

En la Figura 6.15 se muestran unos ejemplos de modelos extraídos de la base de datos de mobiliario. Como puede apreciarse, el mobiliario presente en la base de datos es muy diverso, debido a que se pretende trabajar en el sensado de interiores dispares, ya sean habitaciones pertenecientes a viviendas o a lugares de trabajo.



Figura 6.15: Diferentes modelos 3D almacenados en la base de datos: armarios, sillas y mesas.

En primer lugar, se generan diferentes modelos paramétricos mediante una herramienta de modelado (3D Studio Max) y se lleva a cabo un estudio topológico de los mismos. De cada objeto se genera una malla, cuyas facetas (no necesariamente triangulares) se dividen formando triángulos.

En función de la resolución de puntos deseada en la nube de puntos del modelo, cada triángulo se divide en otros tres más pequeños. Para realizar esta operación (ver Figura 6.16b), se genera un vértice nuevo E a partir del centroide de cada faceta. Este proceso se realiza hasta que la distancia entre vértices se ajuste a la resolución requerida.

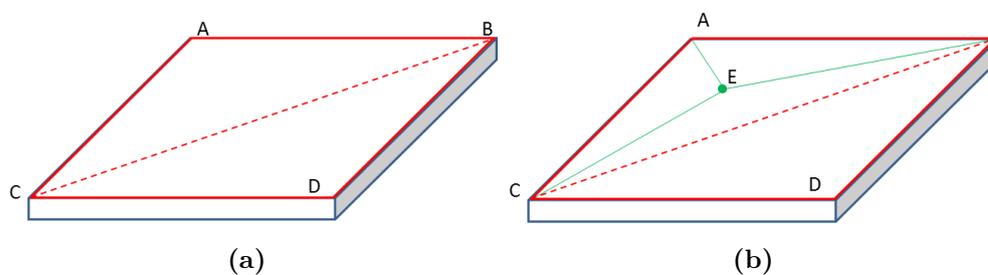


Figura 6.16: Proceso de división de facetas.

A continuación, en la Figura 6.17, se muestran dos ejemplos de nubes de puntos de objetos obtenidas a partir de los modelos 3D.

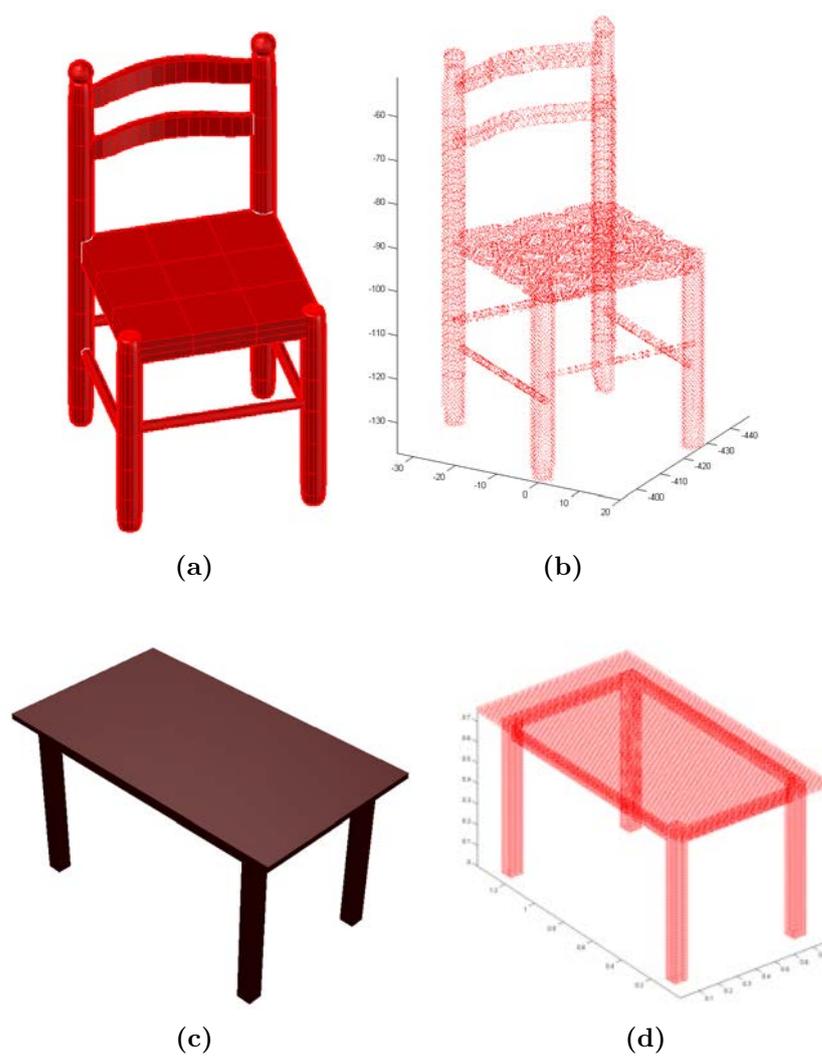


Figura 6.17: Modelos 3D CAD y vértices de modelos triangulares de objetos virtualizados. a) Modelo 3D silla. b) Vértices de modelo triangular silla. c) Modelo 3D mesa. d) Vértices de modelo triangular mesa.

6.2. Entorno 1

A lo largo de esta sección se presentan los resultados obtenidos tras evaluar los datos adquiridos en el Laboratorio de Realidad Virtual, cuyo plano se muestra en la Figura 6.18.

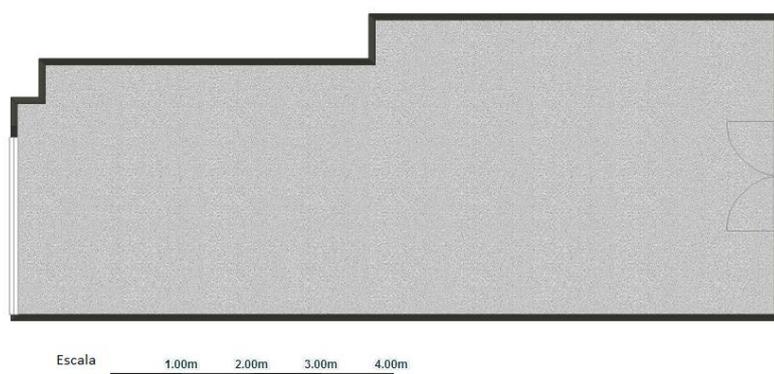


Figura 6.18: Plano del Laboratorio de Realidad Virtual.

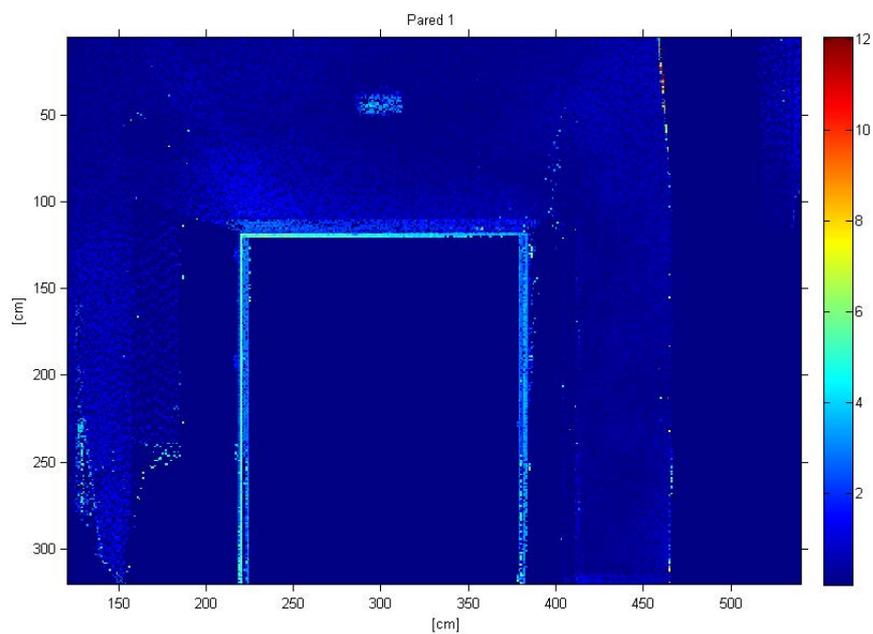
Para conseguir los puntos 3D de la totalidad de la escena, se seleccionaron seis localizaciones estratégicas donde posicionar los sensores. Estas posiciones se deciden gracias a la experiencia del operario que realiza las labores de escaneo. De estas seis posiciones del láser, se obtuvieron alrededor de 38 millones de puntos. En el escenario se ubicaron 12 etiquetas RFID: 7 adheridas a sillas, 4 a mesas y 1 a armarios.

6.2.1. Resultados para la segmentación de paredes y generación de modelos B-Rep

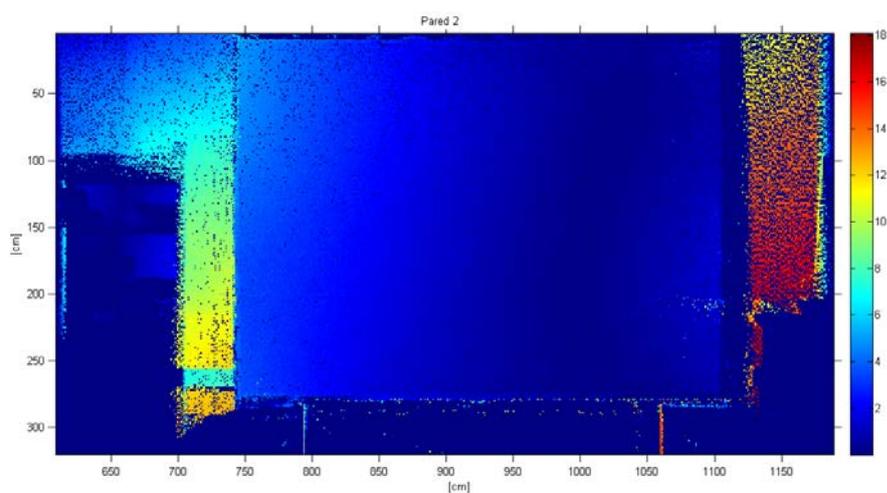
6.2.1.1. Ajuste de paredes mediante planos

Una vez segmentadas las paredes, el siguiente proceso consiste en calcular la precisión de los modelos obtenidos. En primer lugar, se determina el error cometido al representar las paredes mediante planos. Para ello, se mide la distancia cuadrática de cada uno de los puntos de las paredes a sus correspondientes

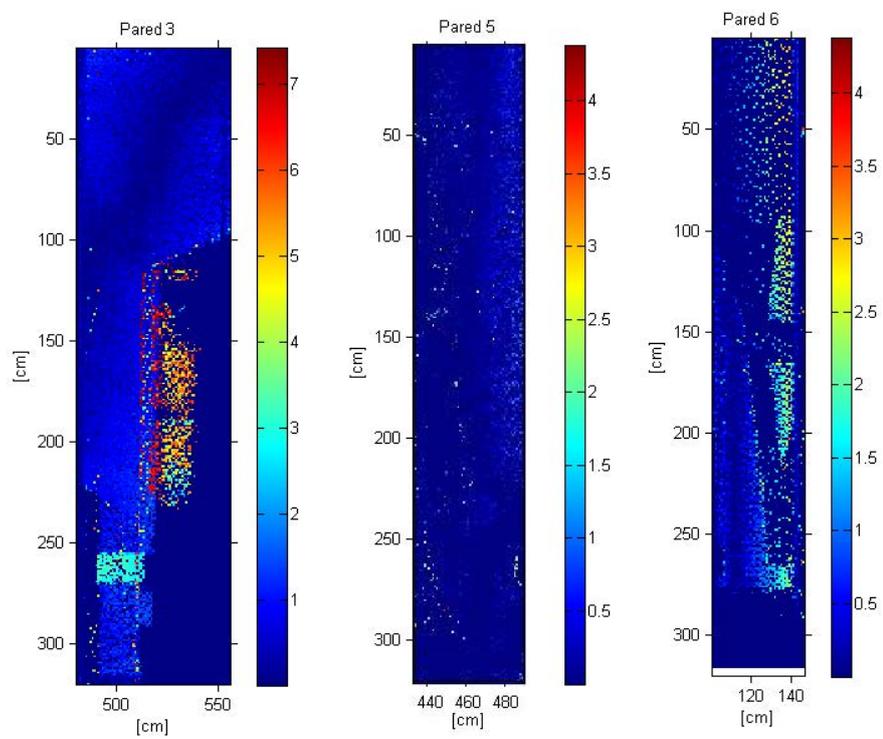
planos. Las distancias entre puntos sensados y los planos son representadas con mapas de color en la Figura 6.19 para las paredes del laboratorio. Puede apreciarse cómo en ciertas regiones se produce una importante variación de color. Estas áreas pueden pertenecer a objetos que cuelgan de las paredes (cuadros, posters ...), o molduras. Por supuesto, algunos de los errores aparecen debido a que los muros no son totalmente planos.



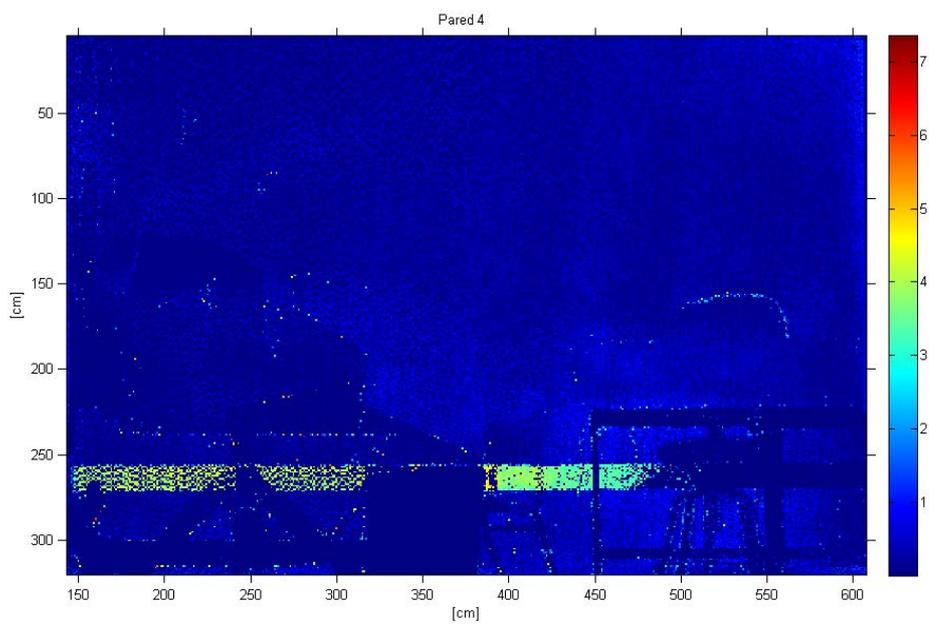
(a)



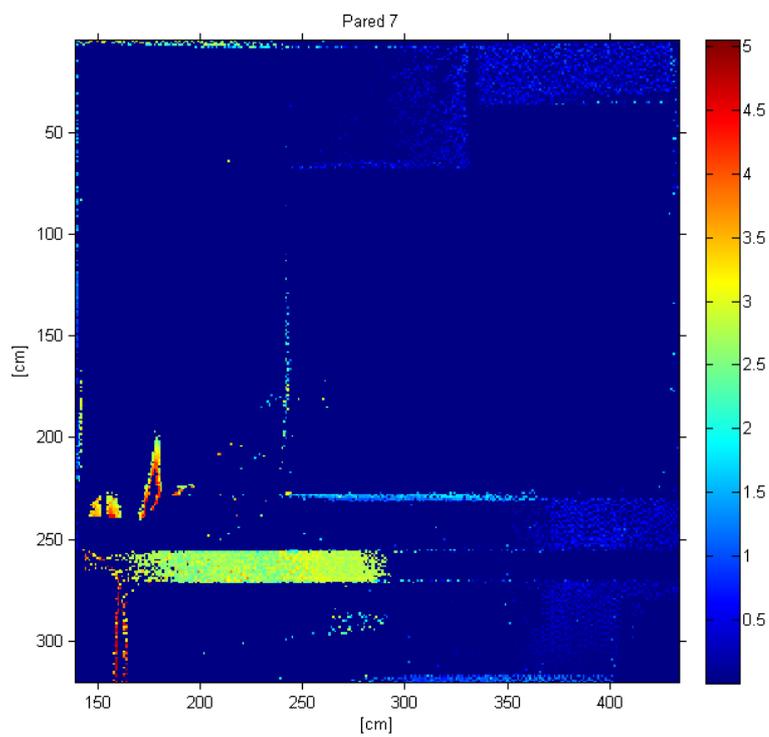
(b)



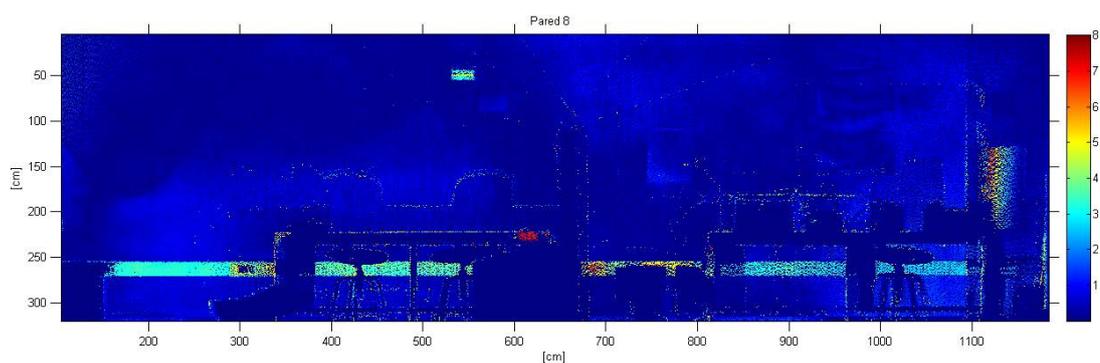
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 6.19: Desviación de los puntos de las paredes del laboratorio a los planos de ajuste. (Los mapas de color están codificados en centímetros).

En la Figura 6.19b, correspondiente a la pared 2, se puede apreciar la distancia existente entre algunos puntos y el plano que ajusta a la pared. Esto se debe a la presencia de un plano de proyección ubicado justo delante del muro y que ocupa la mayor parte del mismo. En la pared 3 también hay una región más distante al plano. En este caso, un mueble con estantes está adherido al muro. Los datos 3D de una de las caras internas del mueble se han segmentado como parte de la pared. Y en las paredes 3,4,7 y 8, la presencia de regletas que facilitan el cableado de la habitación elevan el error medio en el ajuste. Los diferentes elementos que producen estos errores pueden apreciarse en la imagen planar del laboratorio de la Figura 6.20.

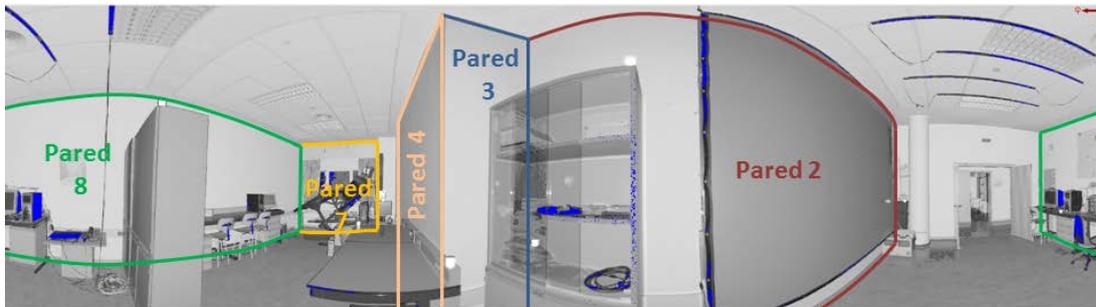


Figura 6.20: Imagen planar del laboratorio.

La media de error, para cada pared del laboratorio, se presenta en la Tabla 6.1, en la cual \bar{d} representa el valor medio para las distancias entre cada punto 3D y su plano correspondiente.

| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | Media |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| $\bar{d}[cm]$ | 1.13 | 4.64 | 1.71 | 0.59 | 0.81 | 1.44 | 1.23 | 1.66 | 1.58 |

Tabla 6.1: Desviación media de los datos escaneados del laboratorio a las paredes ajustadas.

El error medio de los planos ajustados oscila entre los 0.59 y los 4.64 centímetros. En cualquier caso, para la mayoría de las paredes el error medio está por debajo de los 2 centímetros, a pesar de estar los muros severamente ocluidos por mobiliario. Por otro lado, la pared que peor ajusta es la número 2. Como se ha mencionado anteriormente, esto se debe a la presencia de un gran panel

de proyección el cual ocupa la mayor parte del muro. La mayoría de los puntos sensados en esta parte de la habitación (ver Figura 6.19b) corresponden al panel, por lo que el plano ajusta al panel en lugar de a la pared.

6.2.1.2. Estudio del B-Rep generado

A continuación, después de generar el modelo *B-Rep* a partir de los planos ajustados a las paredes, se comparan determinados parámetros del modelo obtenido con los equivalentes del modelo cierto (o *ground truth*).

Con el fin de evaluar los resultados obtenidos, se han considerado dos aspectos: cómo de bueno es el algoritmo a la hora de detectar las paredes y con qué precisión se han modelado las mismas. Para responder a la primera pregunta, se comparan las paredes detectadas con las de un modelo *ground truth*. No se detectaron errores en este proceso y todas las paredes fueron correctamente detectadas. Los fallos en la detección de las mismas podrían deberse, principalmente, a severas circunstancias de oclusión.

La segunda cuestión se abordó a partir de la geometría *ground truth* de la escena. De una forma manual y con el fin de generar estos modelos base, se tomaron medidas de los interiores con la ayuda de un dispositivo láser Leica DISTOTM A6, con una precisión de 1 milímetro. Con el objetivo de valorar el error cometido, el modelo *ground truth* fue comparado con la geometría *B-Rep* creada por el algoritmo desarrollado en la sección 4.2.3 (ver Figura 6.21).

Los resultados se reflejan en la Tabla 6.2. En primer lugar, se comparan las longitudes de las aristas verticales y horizontales de cada cara del modelo *ground truth* con su correspondiente del modelo generado por el algoritmo. Esta diferencia entre longitudes se denota d_h para las aristas horizontales y d_v para las verticales.

El valor de d_v es similar para todos los pares de muros; alrededor de 0.87 centímetros. El valor medio de d_h es menor que 2 centímetros.

Con el objetivo de comparar la precisión en la orientación de las paredes del modelo obtenido, se calcula la diferencia entre los vectores normales correspon-

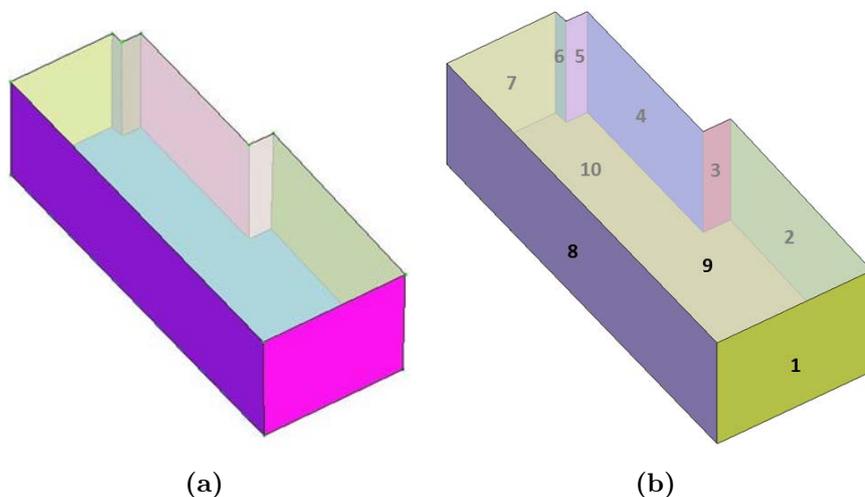


Figura 6.21: a) Modelo B-Rep obtenido del laboratorio y b) *ground truth*.

dientes (α en la Tabla 6.2). Las paredes más pequeñas tienen un valor más alto de α , lo que distorsiona el valor medio de este parámetro. Por tanto, aunque el valor medio de α es de 1.59° en este caso, en la mayoría de los muros el valor de α es menor.

| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | Media |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| $\alpha[^\circ]$ | 1.09 | 0.09 | 1.12 | 1.58 | 6.62 | 4.83 | 0.08 | 0.45 | 1.59 |
| $d_v[cm]$ | 0.81 | 0.80 | 0.89 | 0.90 | 0.90 | 0.89 | 0.89 | 0.90 | 0.87 |
| $d_h[cm]$ | 0.52 | 3.21 | 1.83 | 1.96 | 1.12 | 0.60 | 0.98 | 4.86 | 1.88 |

Tabla 6.2: Parámetros calculados para cada par de paredes pertenecientes al laboratorio.

Tras evaluar los resultados obtenidos para los elementos estructurales correspondientes a paredes, suelo y techo, se muestra a continuación la solución encontrada a la hora de identificar los elementos de tipo hueco y columna.

La Figura 6.22 ilustra la posición de los huecos detectados, así como la columna identificada y posicionada en el escenario.

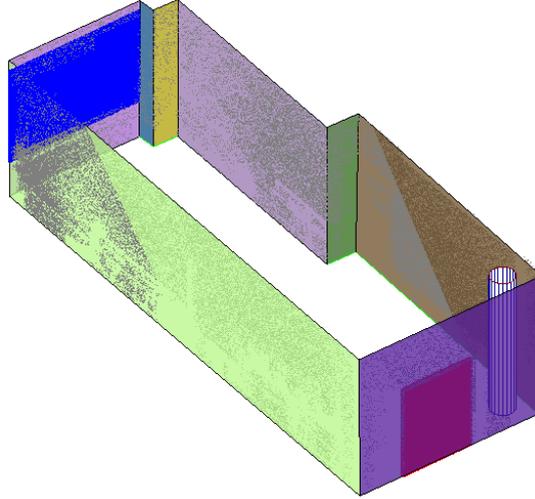


Figura 6.22: Elementos estructurales huecos y columna detectados en el laboratorio.

En la Tabla 6.3 se reflejan diferentes parámetros que, de forma cuantitativa, evalúan el posicionamiento de las puertas y ventanas identificadas. Los parámetros estudiados son: la diferencia entre la posición del centroide del hueco real y el calculado mediante el algoritmo propuesto en el apartado 4.3, denotada como d_c y las diferencias de tamaño en vertical d_v y en horizontal d_h existentes entre elementos reales y calculados.

| | Puerta | Ventana |
|-----------|---------------|----------------|
| $d_c[cm]$ | 3.92 | 17.24 |
| $d_v[cm]$ | 4 | 25 |
| $d_h[cm]$ | 6 | 1 |

Tabla 6.3: Parámetros calculados para los elementos estructurales identificados en el laboratorio.

En esta nube de puntos se han detectado una puerta y una ventana. Mientras que en el caso de la puerta se obtienen diferencias en torno a 5 centímetros, en el caso de la ventana, las diferencias son mayores. Esta diferencia, de 25 centímetros en la altura de la ventana, se debe a que la ventana está dotada de diferentes per-

sianas que están subidas a diferentes alturas y dificultan la correcta identificación del elemento estructural.

Con respecto a la identificación y posicionamiento de la columna presente en el escenario, los parámetros que permiten evaluar su pose se muestran en la Tabla 6.4. La inclinación de la columna calculada respecto de la vertical es de menos de 1° . La diferencia entre el radio medido y el calculado por el algoritmo (d_{radio}) es de 0.1 centímetros y la diferencia entre centroides en la base de las columnas real y calculada (d_c) es de 5 milímetros.

| Columna | |
|------------------|--------|
| $\alpha[^\circ]$ | 0.5065 |
| $d_{radio}[cm]$ | 0.1 |
| $d_c[cm]$ | 0.5 |

Tabla 6.4: Parámetros calculados para los elementos estructurales identificados en el laboratorio.

6.2.2. Elementos no permanentes

Después de llevar a cabo el estudio de los elementos estructurales, se ha evaluado la pose de los diferentes elementos no permanentes presentes en el escenario. En el caso del Laboratorio de Realidad Virtual, se ha trabajado sobre una configuración de la escena, en la cual se han dispuesto siete sillas de tres modelos distintos, cuatro mesas diferentes y un armario.

En la Figura 6.23 se pueden apreciar los diferentes modelos identificados en el escenario. Se han identificado y posicionado determinados objetos dispersos, ubicados sin seguir ningún patrón establecido y con un alto grado de oclusiones. Para facilitar la visión de los elementos dinámicos presentes en la habitación, se han omitido los puntos correspondientes a las paredes, el suelo y el techo. Las regiones visualizadas en color gris constan de alrededor de un millón de puntos. Sobre la nube de puntos se han introducido, de manera automática, los modelos de los objetos reconocidos en la posición calculada. En nomenclatura anglosajona

el modelo de esta escena se denomina modelo *as-built*. Como se aprecia, existen elementos que no son reconocidos en este proceso, como un sistema de proyección, cortinas, un armario de puertas acristaladas y pequeños elementos de mobiliario.

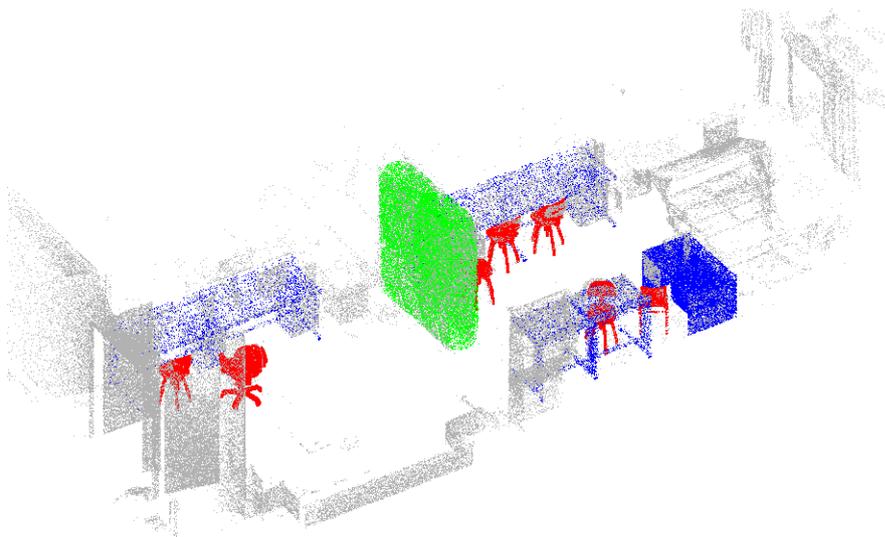


Figura 6.23: Nubes de puntos del laboratorio y objetos no permanentes identificados.

Con objeto de evaluar la precisión del método, y de igual modo que en el caso de los elementos estructurales, se ha generado un modelo *ground truth* del escenario. Dicho modelo ha sido creado manualmente a partir de la medida de la posición y la orientación real de cada uno de los objetos en el escenario. Conocido esto, el modelo de cada objeto es insertado en la posición correcta mediante un software comercial de creación de gráficos 3D. Nótese que cada modelo de un objeto es una malla regular con densidad de 1 punto por cada $5mm^2$.

La Figura 6.24 muestra el *ground truth* superpuesto a los modelos posicionados según nuestro algoritmo. En los apartados 6.2.2.1 y 6.2.2.2 se presenta una cuantificación de los resultados obtenidos tras la comparación de ambos modelos.

6.2.2.1. Evaluación de reconocimiento

La evaluación del reconocimiento de objetos se ha llevado a cabo de la siguiente manera. Se realiza una asociación por proximidad de puntos del modelo en el

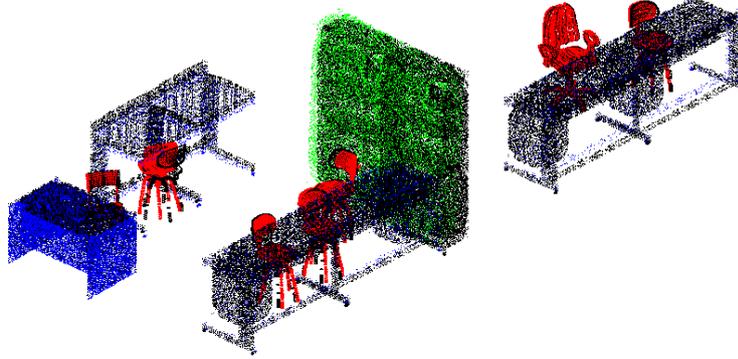


Figura 6.24: Superposición de los modelos ground truth (en negro) y *as-built* (en colores).

ground truth con los del modelo posicionado según el algoritmo propuesto (modelo *as-built*) y se contabiliza el porcentaje de asociaciones que están por debajo de un umbral de distancia. En nuestro caso este umbral es 2.5 cm. Si el porcentaje supera el 50 % se considera que el objeto ha sido correctamente identificado (20).

La Tabla 6.5 muestra el porcentaje P así como la distancia promedio \bar{d} (en centímetros) entre puntos para la disposición de los elementos no permanentes evaluados. En esta tabla y en la siguiente: S = silla, A = armario, M = mesa.

| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | A1 | M1 | M2 | M3 | M4 | m |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| P | 78.48 | 54.66 | 74.87 | 76.84 | 87.41 | 93.72 | 99.93 | 74.68 | 95.47 | 95.95 | 76.02 | 80.49 | 82.38 |
| \bar{d} | 1.64 | 1.67 | 1.69 | 1.57 | 1.64 | 1.43 | 1.71 | 1.84 | 1.39 | 1.40 | 1.45 | 1.56 | 1.58 |

Tabla 6.5: Resultados de reconocimiento.

Como se puede apreciar en la tabla anterior, todos los elementos bajo estudio en la escena han sido correctamente identificados ya que, en todos los casos, el porcentaje de pares de puntos cuya distancia es menor de 2.5 centímetros es superior al 50 %.

La distancia media de los desplazamientos entre objetos de *ground truth* y elementos posicionados es 1.58 centímetros. Los muebles que mejor se ajustan

son las mesas, mientras que el armario y las sillas de cinco patas son aquellos que más se desvían del modelo real.

6.2.2.2. Evaluación de posicionamiento

El caso de estudio anterior permite determinar si los diferentes objetos presentes en el escenario son identificados correctamente. En este apartado se evalúa la precisión del posicionamiento calculado para cada objeto reconocido. Para ello, se ha hallado la matriz de transformación que ajusta cada modelo *as-built* al correspondiente modelo *ground truth*. La Tabla 6.6 muestra los ángulos de rotación (α, ϕ, θ) , en grados, y el vector de traslación $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$, expresados en centímetros, calculados en cada caso. También se muestran los errores promedios (m) para cada uno de ellos. Este cálculo ha sido obtenido mediante un algoritmo ICP aplicado a los puntos de ambos modelos (cierto y calculado).

| Obj | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | A1 | M1 | M2 | M3 | M4 |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| α | 0.34 | 6.79 | 0.26 | 0.31 | 0.33 | 1.16 | 0.21 | 3.69 | 0.15 | 0.45 | 0.51 | 0.12 |
| ϕ | 3.38 | 1.42 | 2.26 | 4.63 | 4.55 | 0.61 | 0.19 | 1.43 | 0.01 | 0.38 | 0.30 | 2.69 |
| θ | 15.18 | 16.59 | 5.82 | 7.50 | 19.59 | 2.10 | 9.16 | 0.26 | 0.28 | 0.97 | 0.03 | 2.70 |
| m | 6.30 | 8.26 | 2.78 | 4.15 | 8.16 | 1.29 | 3.18 | 1.79 | 0.15 | 0.60 | 0.28 | 1.85 |
| Δx | 3.41 | 0.73 | 0.61 | 3.41 | 0.39 | 0.09 | 0.34 | 1.24 | 0.18 | 0.67 | 0.89 | 0.77 |
| Δy | 3.58 | 4.49 | 0.71 | 0.10 | 0.28 | 1.66 | 2.03 | 7.42 | 2.88 | 2.64 | 1.19 | 1.18 |
| Δz | 1.15 | 0.64 | 1.73 | 0.42 | 1.21 | 2.75 | 1.73 | 0.05 | 0.33 | 0.25 | 0.92 | 0.75 |
| m | 2.71 | 1.95 | 1.01 | 1.31 | 0.63 | 1.50 | 1.36 | 2.90 | 1.13 | 1.19 | 1 | 0.90 |

Tabla 6.6: Resultados de posicionamiento.

Se puede apreciar que los errores en los ángulos entre la mayoría de modelos son menores de 5° . Sin embargo, en las sillas (a excepción de la número 6), los errores cometidos en el ángulo θ (giro sobre el eje Z) son excesivamente grandes. Esto se debe a que el asiento y el respaldo giran respecto al eje Z mientras que las patas permanecen fijas, con lo cual el ajuste entre modelos no es muy preciso. En cuanto a los desplazamientos en los ejes, los resultados muestran valores medios por debajo de 2 cm en la mayoría de los casos. En el caso del armario se realiza un peor ajuste, debido a que es el objeto más ocluido.

6.2.3. Modelo 3D del entorno

A partir de los datos obtenidos en esta sección, relativos al posicionamiento de los elementos identificados en el laboratorio se ha generado un modelo tridimensional de la escena. En este modelo 3D se pueden apreciar muros, huecos y columnas, así como los elementos no permanentes. La Figura 6.55 ilustra el escenario generado.

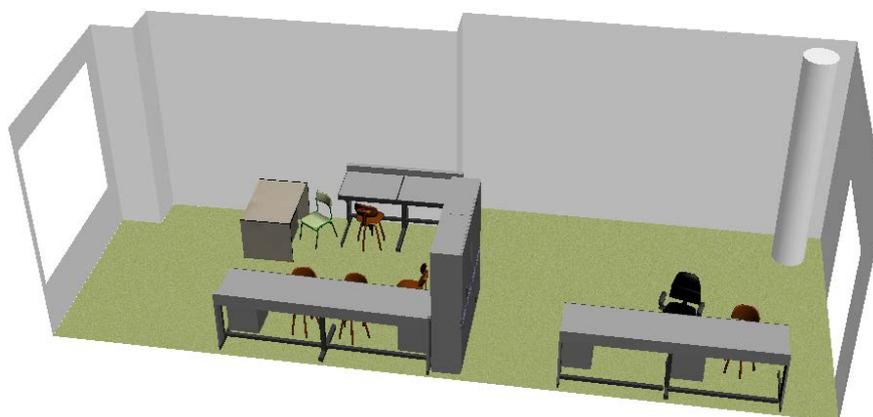


Figura 6.25: Modelo 3D del Laboratorio de Realidad Virtual.

6.3. Entorno 2

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el segundo de los entornos estudiados, correspondiente al salón de una vivienda, como se mencionó con anterioridad. La Figura 6.26 muestra el plano de la habitación.

En dicho salón se estudiaron tres configuraciones distintas, en las cuales se modificó la posición y la orientación de los elementos no permanentes. Para cada una de estas configuraciones del escenario, se obtuvo información desde cinco localizaciones diferentes, obteniendo en torno a 8 millones de puntos. La Tabla 6.7 muestra el número de elementos no permanentes etiquetados en cada configuración.

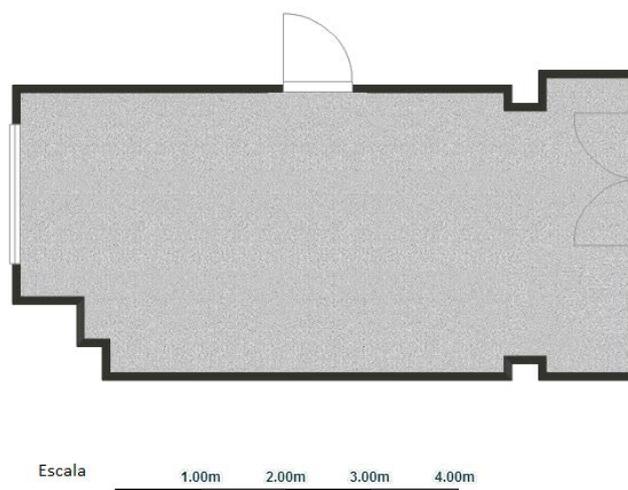


Figura 6.26: Plano del salón.

| | Escena 1 | Escena 2 | Escena 3 |
|----------------|----------|----------|----------|
| Nº de mesas | 3 | 3 | 3 |
| Nº de sillas | 5 | 6 | 5 |
| Nº de armarios | 2 | 2 | 3 |

Tabla 6.7: Número de elementos no permanentes etiquetados.

6.3.1. Resultados para la segmentación de paredes y generación de modelos B-Rep

6.3.1.1. Ajuste de paredes mediante planos

Como en el estudio del entorno anterior, después de segmentar los puntos correspondientes a las paredes de la habitación y ajustar los muros mediante planos, se evalúa la bondad del ajuste midiendo las distancias entre puntos sensorados y planos ajustados. La Figura 6.27 muestra los resultados de una forma visual para los muros más característicos.

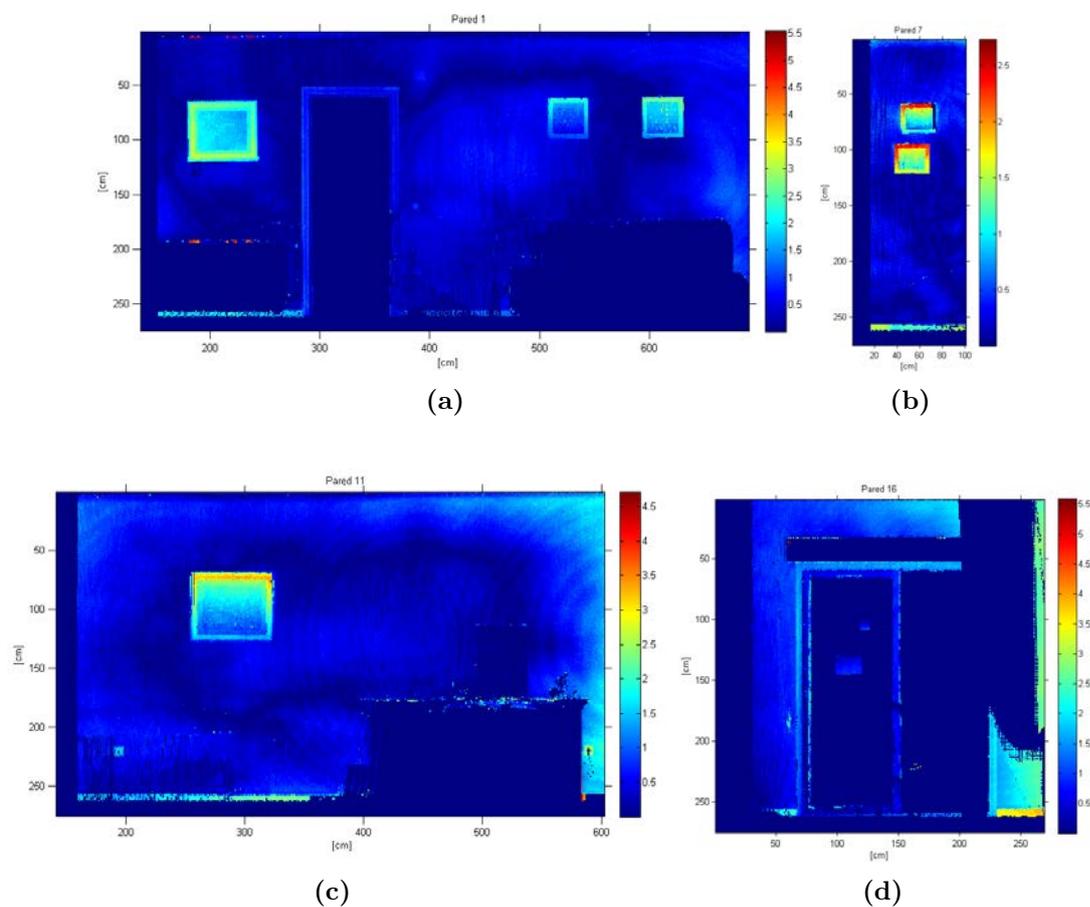


Figura 6.27: Desviación de los puntos a los planos de ajuste. (Los mapas de color están codificados en centímetros).

La Tabla 6.8 muestra la media de error para el ajuste de cada una de las paredes, siendo \bar{d} el valor medio para las distancias entra cada punto sensado y el plano correspondiente.

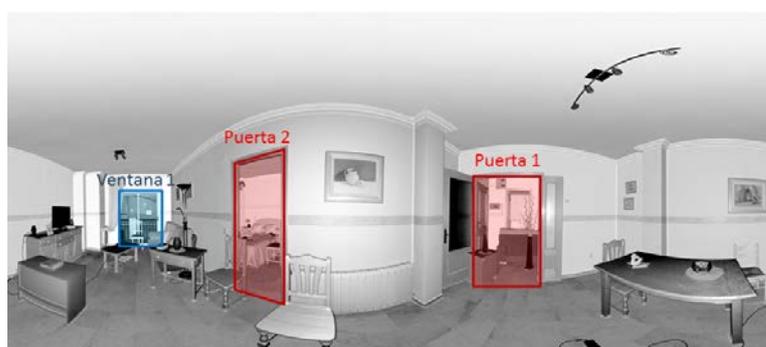
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| $\bar{d}[cm]$ | 0.55 | 1.11 | 0.82 | 0.19 | 6.52 | 4.60 | 0.24 | 1.86 |
| P9 | P10 | P11 | P12 | P13 | P14 | P15 | P16 | Media |
| 0.33 | 0.57 | 0.49 | 4.11 | 0.44 | 0.40 | 0.28 | 1.08 | 1.47 |

Tabla 6.8: Desviación media de los datos escaneados del salón a las paredes ajustadas.

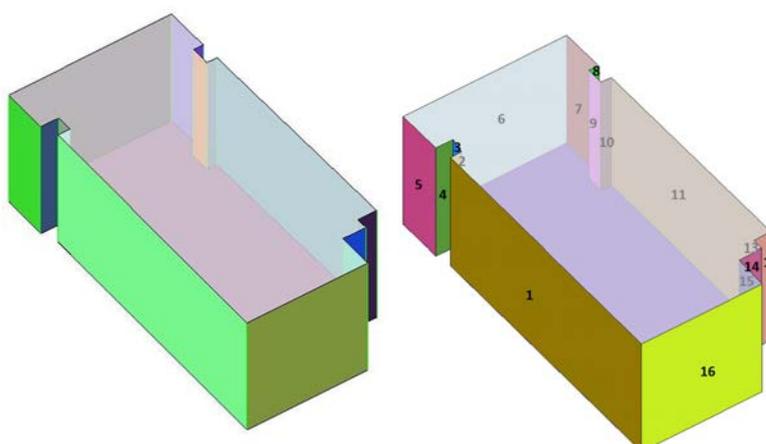
El error medio en el ajuste de los planos está entre los 0.24 y los 6.52 centímetros de la pared 5. En la mayoría de las paredes, que se corresponden con las de mayor área, el error medio es inferior a 2 centímetros igual que en el entorno evaluado anteriormente. Las paredes que peor se ajustan son las más estrechas, que cuentan con menos puntos sensados.

6.3.1.2. Estudio del B-Rep generado

Tras generar el modelo *B-Rep*, como se muestra en la Figura 6.28, se lleva a cabo una comparación cuantitativa con el modelo *ground truth*.



(a)



(b)

(c)

Figura 6.28: a) Imagen planar del salón. b) Modelo B-Rep obtenido y c) *ground truth*.

Al igual que en el caso anterior, se evalúa la detección de las paredes así como la precisión en la creación del modelo. También como en el entorno anterior, se ha generado un modelo base con la ayuda de un dispositivo láser.

A continuación, en la Tabla 6.9, se muestran las diferencias entre el modelo generado y el cierto. Para ello, se mide la diferencia entre longitudes (vertical d_v y horizontal d_h) y entre la orientación de las paredes (α).

| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 |
|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| $\alpha[^\circ]$ | 2.25 | 10.3 | 0.95 | 2.49 | 0.12 | 0.72 | 6.62 | 0.16 |
| $d_v[cm]$ | 0.80 | 0.79 | 0.79 | 0.80 | 0.79 | 0.79 | 0.80 | 0.80 |
| $d_h[cm]$ | 0.74 | 0.39 | 0.09 | 0.99 | 0.15 | 1.80 | 0.11 | 2.05 |
| P9 | P10 | P11 | P12 | P13 | P14 | P15 | P16 | Media |
| 3.86 | 2.55 | 1.12 | 0.89 | 0.58 | 0.20 | 0.11 | 0.56 | 1.85 |
| 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 |
| 0.32 | 1.46 | 2.18 | 1.31 | 1.29 | 2.15 | 1.17 | 4.45 | 1.29 |

Tabla 6.9: Parámetros calculados para cada par de paredes pertenecientes al salón.

El valor de d_v está alrededor de 0.80 centímetros para todas las paredes y el valor medio de d_h es de 1.88 centímetros. Como ocurre en el caso del entorno 1, los valores de α son mayores para las paredes más pequeñas.

Una vez presentados los resultados para estos dos interiores habitados, se pueden establecer algunas diferencias entre ellos. El salón tiene más paredes y más pequeñas que el laboratorio, lo que puede llevar al lector a creer que el proceso de segmentación es más complicado en este caso. Sin embargo, si se comparan los valores medios de los diferentes parámetros en las Tablas 6.1-6.8 y 6.2-6.9, las desviaciones con el modelo *ground truth* son menores en el caso del salón. Este resultado puede deberse al hecho de que, en el laboratorio, numerosos muebles y dispositivos tecnológicos producían oclusiones en los muros y, consecuentemente, durante el proceso de identificación de paredes se generan segmentos más imprecisos.

Como en el entorno anterior, una vez que se han definido los elementos estructurales correspondientes a las paredes, se determina la posición de los huecos relativos a ventanas y puertas. La Figura 6.29 muestra los elementos identificados.

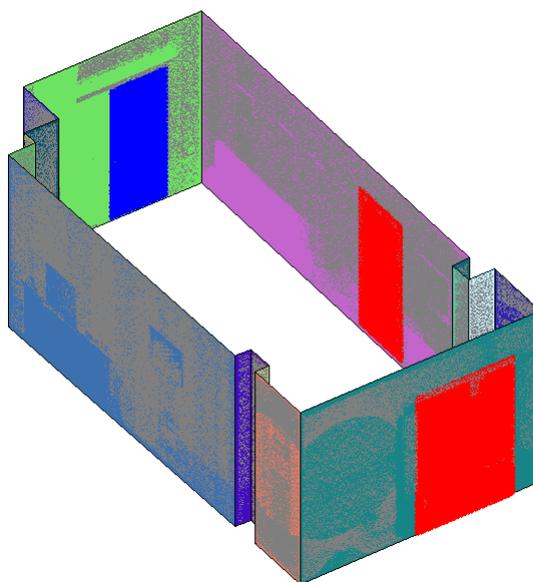


Figura 6.29: Elementos estructurales huecos identificados en el salón.

En el salón se han reconocido dos huecos correspondientes a elementos de tipo puerta y uno correspondiente a una ventana. Del mismo modo que en el caso del laboratorio, se evalúan una serie de parámetros que determinan la bondad del ajuste. La Tabla 6.10 muestra los resultados obtenidos.

| | P1 | P2 | V1 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $d_c[cm]$ | 0.78 | 1.07 | 41.76 |
| $d_v[cm]$ | 0 | 0 | 2 |
| $d_h[cm]$ | 2 | 1 | 87 |

Tabla 6.10: Parámetros calculados para los elementos estructurales identificados en el salón.

Como puede observarse, las puertas calculadas se ajustan con mayor precisión al modelo real que las ventanas. En este caso, las distancias entre centroides, así

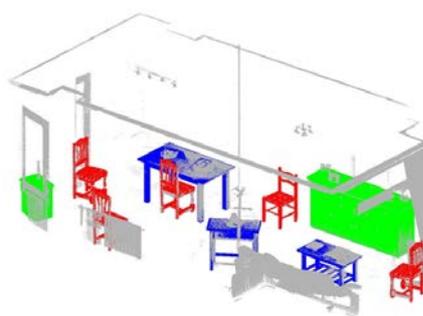
como las diferencias de tamaño en alto y ancho, son inferiores a 2 centímetros. Sin embargo, la ventana solo es identificada parcialmente. Esto se debe a que una cortina ocluye un lateral del hueco, haciendo que una parte de la ventana no se ajuste a un rectángulo y no sea identificada como tal.

6.3.2. Elementos no permanentes

La Figura 6.30 muestra las tres configuraciones dispuestas para este estudio. En el salón se han identificado y posicionado determinados objetos dispersos, ubicados sin seguir ningún patrón establecido y con un alto grado de oclusiones. Para facilitar la visión de los elementos dinámicos presentes en la habitación, se han omitido los puntos correspondientes a las paredes, el suelo y el techo. Las regiones visualizadas en color gris constan de alrededor de un millón de puntos. Sobre la nube de puntos se han insertado los modelos de los objetos reconocidos en las posiciones calculadas. En nomenclatura anglosajona el modelo de esta escena se denomina modelo *as-built*. Como se aprecia, existen elementos que no son reconocidos en este proceso, como cortinas, marcos de las puertas, un radiador, un sofá y otros pequeños objetos.



(a)



(b)

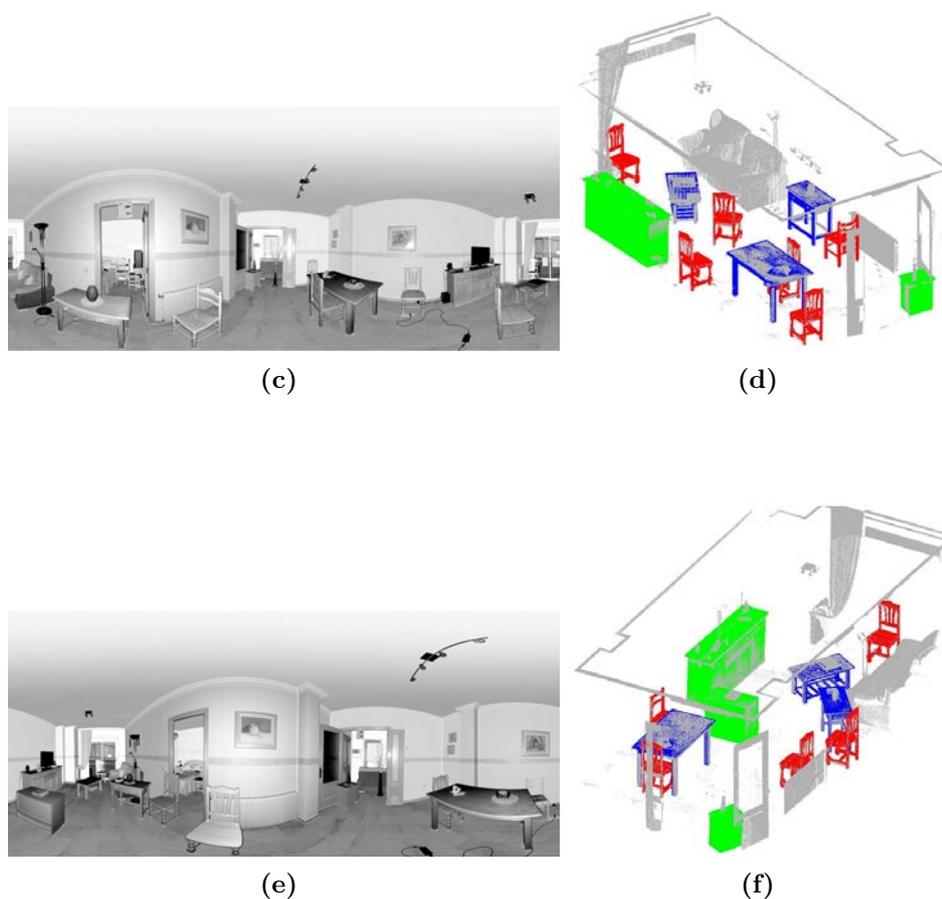


Figura 6.30: Nubes de puntos y objetos identificados en tres configuraciones de un interior habitado. a) Imagen planar y b) objetos posicionados en la configuración 1. c) Imagen planar y d) objetos posicionados en la configuración 2. e) Imagen planar y f) objetos posicionados en la configuración 3.

De nuevo, con el fin de evaluar los resultados obtenidos en el posicionamiento de los objetos en la escena, se ha generado un modelo *ground truth* de cada una de las configuraciones. Este modelo ha sido generado de forma manual a partir de la medida de la posición y la orientación real de cada uno de los objetos en el escenario. Como en el caso anterior, cada modelo es una malla regular con densidad de 1 punto por cada $5mm^2$.

La Figura 6.31 muestra el *ground truth* superpuesto a los modelos posicionados, según el algoritmo desarrollado, para una de las tres configuraciones. En

los apartados 6.3.2.1 y 6.3.2.2 se presenta una cuantificación de los resultados obtenidos tras la comparación de ambos modelos.

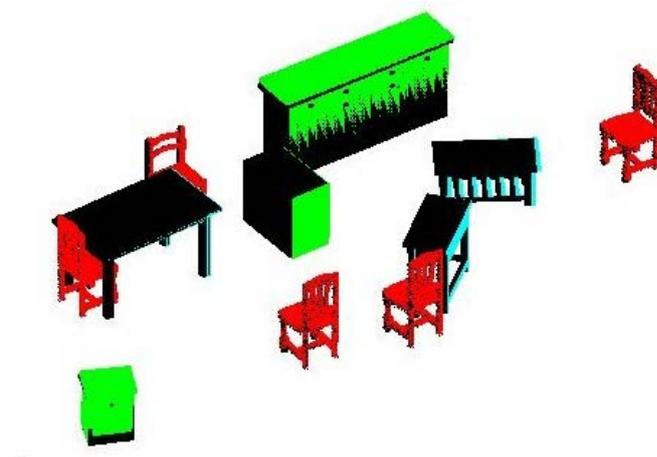


Figura 6.31: Superposición de los modelos *ground truth* (en negro) y *as-built* (en colores).

6.3.2.1. Evaluación de reconocimiento

En este apartado se evalúa el reconocimiento de objetos en cada escenario evaluado. Se lleva a cabo una asociación de pares de puntos entre el modelo generado y el *ground truth*, y el objeto se considera identificado si el porcentaje de pares encontrados supera el 50 %.

La Tabla 6.11 muestra el porcentaje P así como la distancia promedio \bar{d} (en centímetros) entre puntos para las tres configuraciones estudiadas. En esta tabla y en la siguiente: S = silla, A = armario, M = mesa.

Como se puede apreciar en la tabla anterior, todos los elementos bajo estudio en la escena han sido correctamente identificados ya que, en todos los casos, el porcentaje de pares de puntos cuya distancia es menor de 2.5 centímetros es superior al 70 %. La distancia media por configuraciones es 1.4 cm, 1.6 cm y 1.4 cm respectivamente. La Figura 6.32 ilustra un ejemplo en el que se puede apreciar visualmente la desviación de modelo *as-built* (en verde) con respecto al *ground truth* (en rojo). En escala de grises aparecen representadas las distancias entre

| | | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | A1 | A2 | A3 | M1 | M2 | M3 | m |
|----------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------------|
| 1 | P | 88.40 | 80.74 | 80.10 | 100 | 99.47 | - | 81.61 | 53.43 | - | 100 | 99.98 | 100 | 88.4 |
| | \bar{d} | 1.28 | 1.63 | 1.82 | 1.69 | 1.68 | - | 1.83 | 1.84 | - | 0.84 | 1.06 | 0.30 | 1.4 |
| 2 | P | 99.08 | 99.25 | 96.13 | 98.31 | 92.67 | 73.4 | 66.08 | 51.88 | - | 99.65 | 86.98 | 69.55 | 76.4 |
| | \bar{d} | 1.58 | 1.72 | 0.99 | 1.73 | 1.88 | 1.75 | 1.67 | 1.75 | - | 0.93 | 1.45 | 0.89 | 1.6 |
| 3 | P | 97.16 | 100 | 82.95 | 93.76 | 83.21 | - | 77.61 | 71.68 | 100 | 100 | 90.57 | 87.48 | 89.5 |
| | \bar{d} | 1.73 | 1.54 | 1.67 | 1.84 | 1.41 | - | 1.66 | 1.58 | 1.68 | 0.91 | 1.22 | 0.72 | 1.4 |

Tabla 6.11: Resultados de reconocimiento para cada una de las tres configuraciones.

pares de puntos (en cm). Se puede apreciar un desplazamiento entre modelos, por lo que los pares de puntos más separados entre sí están representados en un tono más claro. Esto se produce en la parte derecha de la mesa, según la figura mostrada.

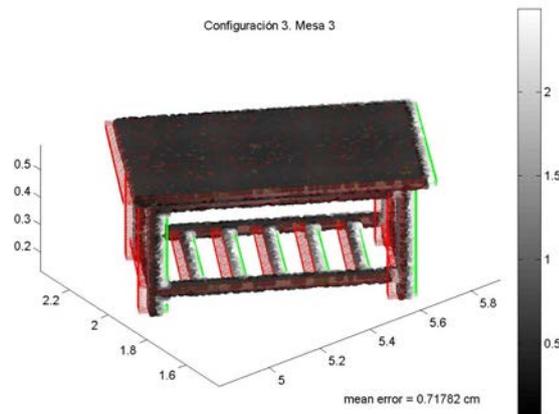


Figura 6.32: Modelos *ground truth* (rojo) y *as-built* (verde) en una de las mesas identificadas.

6.3.2.2. Evaluación de posicionamiento

Después de comprobar si los elementos no permanentes han sido identificados correctamente, se evalúa la precisión del posicionamiento estimado para cada objeto reconocido (ver Tabla 6.12). Para esto, se calculan los ángulos de rotación

(α, ϕ, θ) , medidos en grados, y el vector de traslación $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$, expresado en centímetros, de cada elemento posicionado con respecto al *ground truth*. También se muestran los errores promedios (m) para cada uno de ellos en cada configuración de la escena. Este cálculo ha sido obtenido mediante un algoritmo ICP aplicado a los puntos de ambos modelos.

| Obj | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | A1 | A2 | A3 | M1 | M2 | M3 | | |
|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|
| 1 | α | 0.04 | 0.50 | 0.15 | 0.38 | 0.28 | - | 0.76 | 1.78 | - | 0.00 | 0.06 | 0.05 | |
| | ϕ | 0.25 | 0.43 | 0.32 | 0.01 | 0.60 | - | 0.86 | 1.95 | - | 0.00 | 0.06 | 0.00 | |
| | θ | 0.80 | 0.86 | 0.52 | 0.22 | 0.22 | - | 0.12 | 2.67 | - | 0.16 | 0.89 | 0.05 | |
| | m | 0.36 | 0.60 | 0.33 | 0.20 | 0.37 | - | 0.58 | 2.13 | - | 0.05 | 0.33 | 0.03 | |
| | Δx | 0.80 | 1.03 | 0.59 | 1.03 | 0.80 | - | 1.02 | 3.88 | - | 1.11 | 0.09 | 0.17 | |
| | Δy | 1.01 | 0.19 | 1.61 | 0.65 | 0.50 | - | 2.21 | 5.00 | - | 0.63 | 0.85 | 0.41 | |
| | Δz | 0.81 | 2.99 | 3.30 | 1.35 | 1.59 | - | 2.75 | 2.18 | - | 0.83 | 1.71 | 0.05 | |
| | m | 0.87 | 1.40 | 1.83 | 1.01 | 0.96 | - | 1.99 | 3.69 | - | 0.86 | 0.88 | 0.21 | |
| | 2 | α | 0.63 | 0.69 | 0.18 | 0.48 | 0.34 | 1.23 | 0.87 | 0.04 | - | 0.01 | 0.02 | 0.23 |
| | | ϕ | 0.49 | 0.14 | 0.02 | 0.56 | 1.32 | 0.15 | 0.87 | 2.3 | - | 0.01 | 1.34 | 0.03 |
| θ | | 0.64 | 1.40 | 0.90 | 1.03 | 0.28 | 1.15 | 0.41 | 105.99 | - | 1.23 | 0.52 | 2.03 | |
| m | | 0.59 | 0.74 | 0.37 | 0.69 | 0.65 | 0.84 | 0.72 | 36.11 | - | 0.42 | 0.62 | 0.76 | |
| Δx | | 1.00 | 0.39 | 0.52 | 0.96 | 1.63 | 0.48 | 1.57 | 8.64 | - | 1.15 | 1.97 | 2.89 | |
| Δy | | 0.34 | 1.63 | 0.41 | 1.21 | 1.78 | 2.89 | 1.40 | 1.17 | - | 0.45 | 2.14 | 9.54 | |
| Δz | | 1.22 | 0.96 | 0.58 | 1.26 | 1.52 | 1.11 | 4.41 | 1.58 | - | 1.00 | 2.06 | 0.74 | |
| m | | 0.85 | 0.99 | 0.50 | 1.14 | 1.64 | 1.49 | 2.46 | 3.80 | - | 0.87 | 2.06 | 4.39 | |
| 3 | | α | 0.56 | 0.13 | 0.27 | 0.20 | 0.16 | - | 0.57 | 4.61 | 0.21 | 0.03 | 0.00 | 0.06 |
| | | ϕ | 0.54 | 0.23 | 0.15 | 0.83 | 0.35 | - | 0.83 | 1.07 | 0.10 | 0.00 | 0.08 | 0.22 |
| | θ | 0.79 | 0.81 | 0.03 | 0.61 | 0.78 | - | 0.03 | 0.88 | 0.09 | 0.37 | 0.51 | 0.99 | |
| | m | 0.63 | 0.39 | 0.15 | 0.55 | 0.43 | - | 0.48 | 2.19 | 0.13 | 0.13 | 0.20 | 0.42 | |
| | Δx | 0.33 | 0.55 | 1.00 | 1.86 | 1.19 | - | 1.14 | 0.85 | 1.74 | 1.63 | 2.64 | 3.28 | |
| | Δy | 1.80 | 0.27 | 0.11 | 0.18 | 1.15 | - | 1.29 | 0.64 | 0.61 | 0.36 | 0.95 | 0.85 | |
| | Δz | 1.41 | 1.21 | 1.48 | 1.37 | 0.82 | - | 3.67 | 3.87 | 1.17 | 0.96 | 1.70 | 0.44 | |
| | m | 1.04 | 0.68 | 0.86 | 1.14 | 3.16 | - | 2.03 | 1.79 | 1.17 | 0.98 | 1.76 | 1.52 | |

Tabla 6.12: Resultados de posicionamiento.

Se puede apreciar que los errores en los ángulos entre modelos oscilan entre 0 y $\pm 1^\circ$, a excepción del armario 2 en la segunda configuración, del que se cuenta con pocos datos 3D. Esto hace que su posicionamiento sea erróneo. En cuanto a los desplazamientos en los ejes, los resultados muestran valores medios por debajo

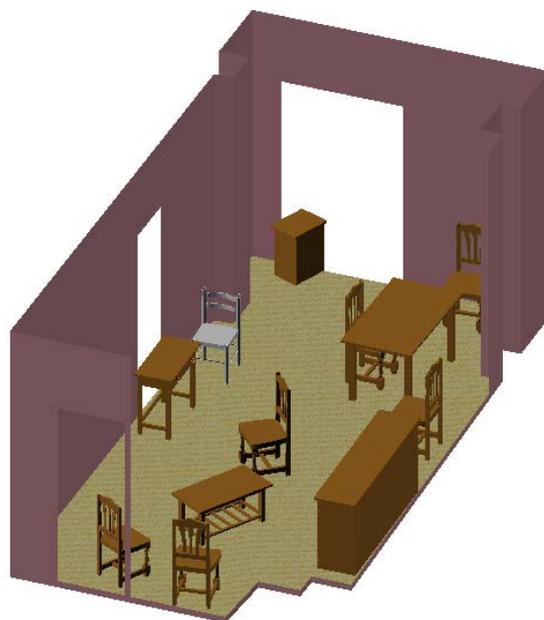
de 2 cm en la mayoría de los casos. En el caso de la mesa 3, representada en la Figura 6.32 se puede comprobar una buena aproximación en cuanto a rotación, mientras que existe un desplazamiento de 3.28 cm en el eje Y.

6.3.3. Modelos 3D del entorno

En este apartado se muestran los modelos 3D generados para cada una de las configuraciones de mobiliario dispuestas en la habitación. Estos modelos son creados mediante un software de modelado sólido a partir de los datos correspondientes a la posición y orientación de elementos estructurales y objetos no permanentes. En la Figura 6.55 se pueden apreciar los escenarios sintéticos.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.33: Modelos 3D del salón. a) Configuración 1. b) Configuración 2. c) Configuración 3.

6.4. Entorno 3. Experimentación sobre un robot móvil

Para llevar a cabo los estudios cuyos resultados se presentan en las secciones 6.2 y 6.3, el escáner láser y el lector RFID son desplazados en el escenario, de forma manual, por un operario. Como se ha mencionado anteriormente, los sensores son ubicados en posiciones estratégicas con el objetivo de adquirir la máxima información posible desde un número mínimo de localizaciones. Con el fin de agilizar esta labor de posicionado de sensores, ambos dispositivos se han instalado sobre un robot móvil *Guardian Mobile Robot* de Robotnik, como muestra la Figura 6.34a. El desarrollo de automatizar la toma de datos en un robot móvil es materia de otra futura tesis doctoral.

6.4.1. Sistema: Escáner-RFID-Robot

El robot móvil está equipado con dos ordenadores. El primero de ellos se encarga de controlar los movimientos del robot en el escenario y el otro, rodeado en rojo en la Figura 6.34b tiene como misión ordenar la toma de datos a los sensores y gestionar la información obtenida por estos.

Ambos ordenadores se comunican entre sí a través de una red WLAN, intercambiando paquetes de datos entre dos programas mediante canales de comunicación llamados *sockets*. Para establecer esta conexión, uno de los equipos arranca un programa (denominado *servidor*) y espera que el otro equipo, a través de un segundo programa (el *cliente*), le solicite información.

Como aparece ilustrado en la Figura 6.35, a uno de los ordenadores (*CPU Sensores*) se conectan el escáner y el lector RFID. El escáner envía los datos adquiridos mediante un cable cruzado de red, a través de una conexión de tipo Protocolo de Control de Transmisión y Protocolo de Internet (TCP/IP por sus siglas en inglés). Este dispositivo se alimenta a través de una batería propia, independiente del robot móvil.

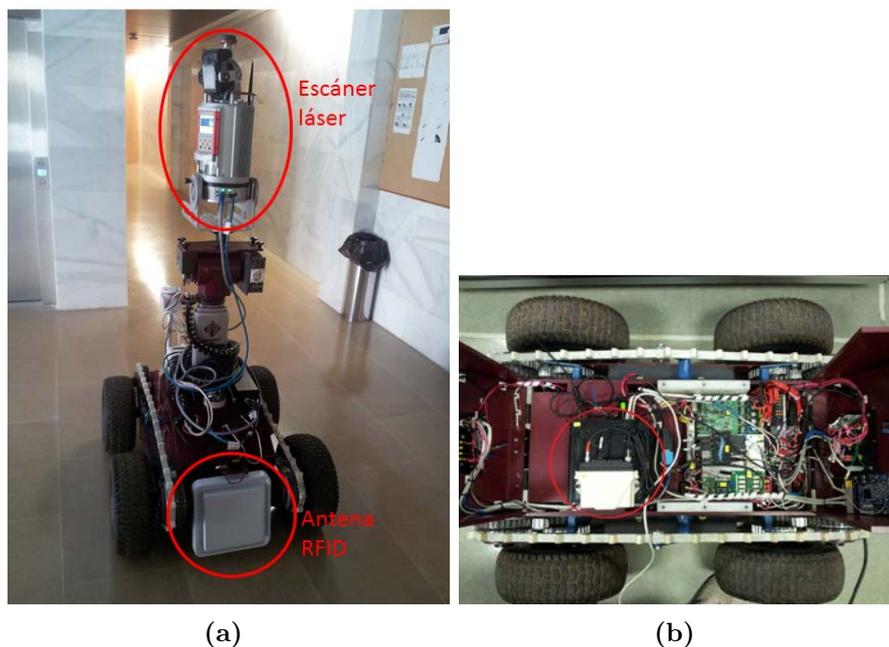


Figura 6.34: a) Robot móvil equipado con el escáner láser Riegl VZ-400 y el lector RFID. b) Equipos y sensorización interna del robot.

Por otra parte, el sensor RFID transmite al equipo *CPU Sensores* los datos obtenidos de las etiquetas por medio de una conexión de tipo bus universal en serie (USB, por sus siglas en inglés). La alimentación de este dispositivo se lleva a cabo a través de la batería del robot móvil.

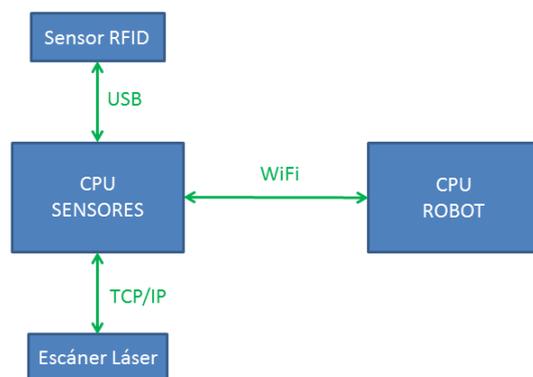


Figura 6.35: Diagrama de comunicación entre los sensores y los equipos internos del robot.

6.4.2. Modo de actuación

En primer lugar, y antes de llevar a cabo el proceso de adquisición de datos, el robot móvil genera un mapa del entorno por medio de un algoritmo de localización y mapeo simultáneo (SLAM, de sus siglas en inglés). Este mapa, como el que se puede apreciar en la Figura 6.36, contiene información acerca de los elementos estructurales que forman la escena y de los diferentes obstáculos que ha ido encontrando en su recorrido.



Figura 6.36: Mapa del entorno generado por el robot.

A partir de esta imagen, el usuario puede indicar al robot las posiciones que considera mejores para la adquisición de datos 3D de la estancia, con el objetivo de escanear completamente el escenario bajo estudio. Una vez determinados estos puntos clave, se lanza el proceso de adquisición representado en el Algoritmo 6.

El *CPU Sensores* indica al robot que debe moverse a la posición inicial, desde donde comienza el proceso de recogida de información. El robot, mediante un planificador de trayectorias, genera la ruta que debe seguir desde su ubicación actual hasta la posición indicada. Una vez que el robot ha llegado a su destino, se comunica con el equipo que activa los sensores para indicar que puede comenzar la adquisición de datos 3D. Cuando finaliza el proceso de sensado, *CPU Sensores* indica al robot que debe moverse a la siguiente posición. Estos pasos se repiten para cada uno de los puntos de escaneo. Al terminar la última toma de datos, el robot vuelve a la posición de partida.

Algoritmo 6 Proceso de adquisición de datos del sistema

```
1: robot → posicion_inicio
2: mientras proceso_adquisicion en marcha hacer
3:   lectura de etiquetas
4:   almacenamiento de datos RFID
5:   para cada posicion_escaneo hacer
6:     lanza adquisicion_3D
7:     almacenamiento datos 3D
8:     robot → posicion_escaneo + 1
9:   fin para
10: fin mientras
```

El lector RFID lee las etiquetas presentes en el entorno mientras dura todo el proceso de adquisición de información.

La Figura 6.37 ilustra el proceso de adquisición de datos 3D y RFID. En la imagen se pueden apreciar distintas etiquetas adheridas a elementos no permanentes del escenario, como son la silla y la mesa (rodeadas en verde). Asimismo, se observa la presencia de diferentes cilindros reflectores (marcados en rojo) que facilitan la labor de registro de la información 3D tal y como se indica en la sección 6.1.4.

6.4.3. Espacios estudiados

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos tras analizar los datos adquiridos en diferentes entornos del Aulario Polivalente de la Facultad de Medicina de la UCLM en Ciudad Real. Más concretamente, se ha trabajado en una planta del edificio, obteniendo información del conjunto de habitaciones y pasillos que conforman dicha planta.

En cada uno de los espacios analizados se contó con diferentes tipos de mesas y de sillas. Además, se añadieron papeleras, elementos que no se habían tenido en cuenta en los entornos estudiados previamente. Para cada una de las aulas se registraron datos desde cinco posiciones diferentes, obteniendo alrededor de 10



Figura 6.37: Sistema de adquisición de datos durante el proceso de sensado.

millones de puntos por habitación y en el pasillo fueron necesarias once tomas de datos. Los elementos no permanentes etiquetados en las diferentes estancias se detallan en la Tabla 6.13.

| | Nº mesas | Nº sillas | Nº papeleras |
|-----------------|----------|-----------|--------------|
| Aula 011 | 3 | 8 | 1 |
| Aula 012 | 3 | 6 | 2 |
| Aula 013 | 3 | 8 | - |
| Aula 015 | 4 | 9 | 1 |
| Aula 016 | 2 | 4 | - |

Tabla 6.13: Número de elementos no permanentes etiquetados.

El plano de la Figura 6.38 muestra la disposición de las diferentes aulas sensadas a lo largo del pasillo.

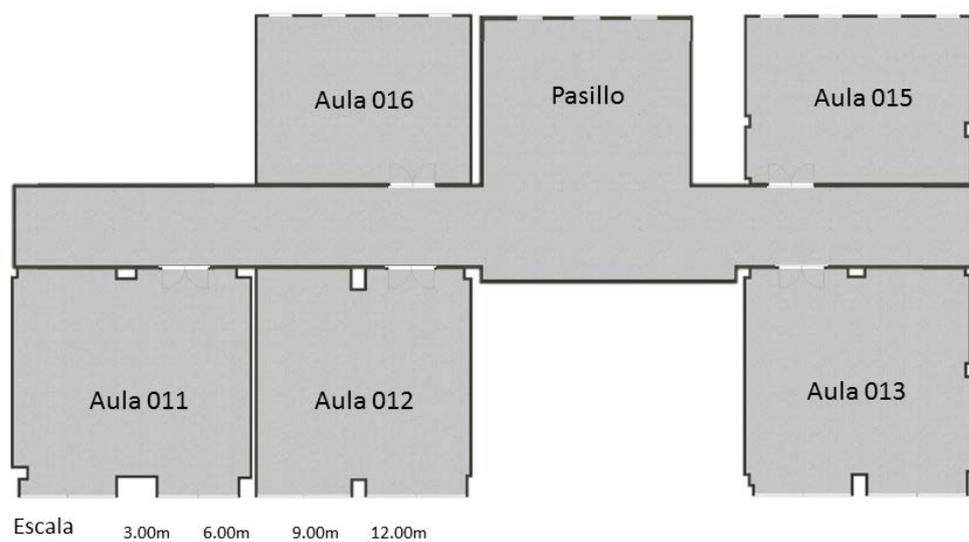


Figura 6.38: Plano del entorno bajo estudio.

6.4.4. Resultados para la segmentación de paredes y generación de modelos B-Rep

6.4.4.1. Ajuste de paredes mediante planos

Tras realizar los procesos de adquisición de información por medio de los dispositivos instalados en el robot móvil y registradas todas las tomas de datos 3D bajo un mismo UCS, los diferentes muros que determinan la estructura de los espacios estudiados son segmentados y aproximados mediante planos. Al realizar este ajuste se comete cierto error que, como en casos anteriores, se evalúa midiendo la distancia cuadrática entre los puntos de las paredes y los planos que aproximan a las mismas.

La Figura 6.39 ilustra mediante mapas de color el resultado obtenido para algunas de las paredes más representativas del entorno.

La mayor parte de las estancias sensadas son aulas, por lo que en sus paredes es común encontrar paneles de proyección o pizarras. Éste es el caso de la pared 10 en el aula 011. Otras paredes significativas son aquellas que incluyen ventanas. Como puede apreciarse, la presencia de cortinas o persianas hace que el vano no

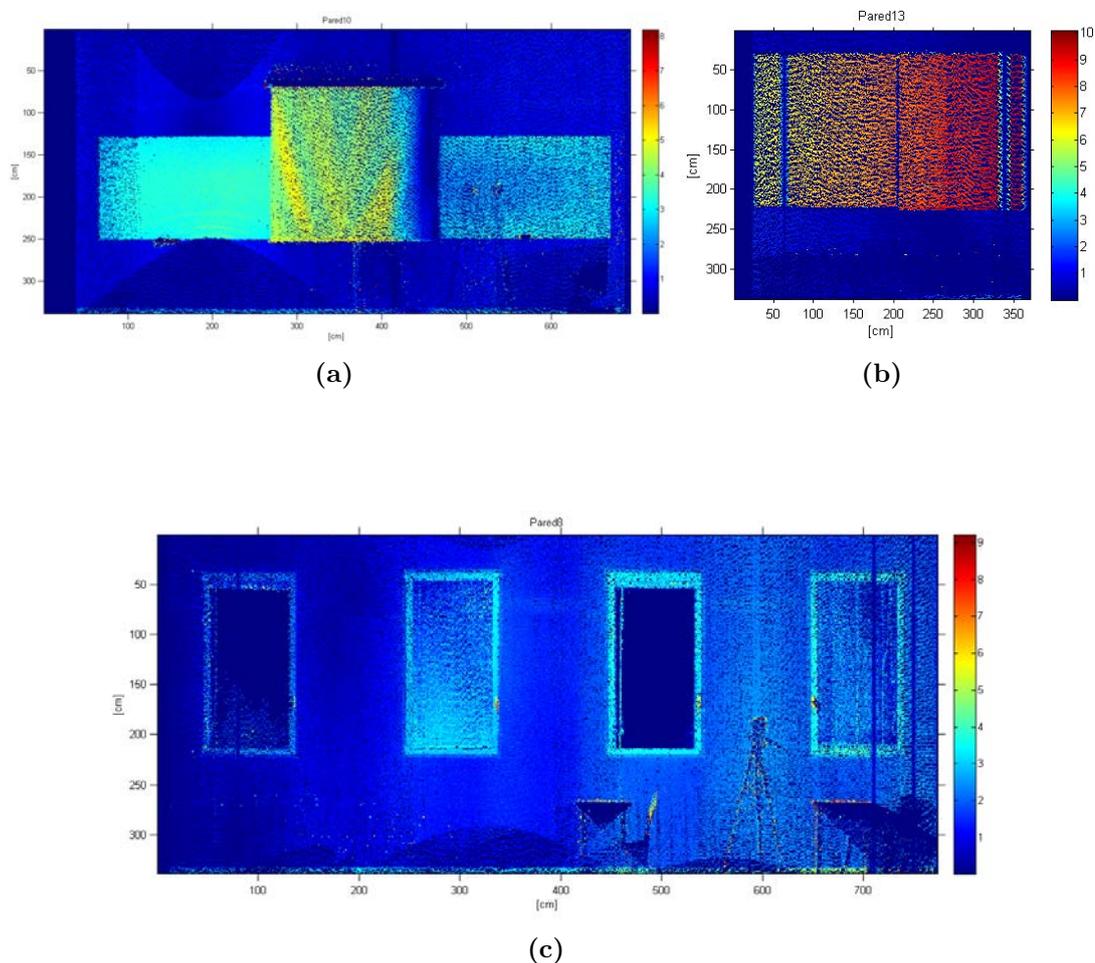


Figura 6.39: Desviación de los puntos de las paredes más significativas del entorno 3 a los planos de ajuste. a) Pared 10 del aula 011. b) Pared 13 del aula 012. c) Pared 8 del aula 015. (Los mapas de color están codificados en centímetros).

se detecte, además de aumentar el error en el ajuste de la pared mediante un plano, como sucede en la pared 13 del aula 012. Las imágenes mostradas en la Figura 6.40 facilitan la interpretación de los gráficos anteriores.

A continuación, en la Tabla 6.14 se muestra la media de error para el ajuste de paredes mediante planos para cada una de las estancias estudiadas. El parámetro \bar{d} representa esta distancia media entre puntos y planos de ajuste.

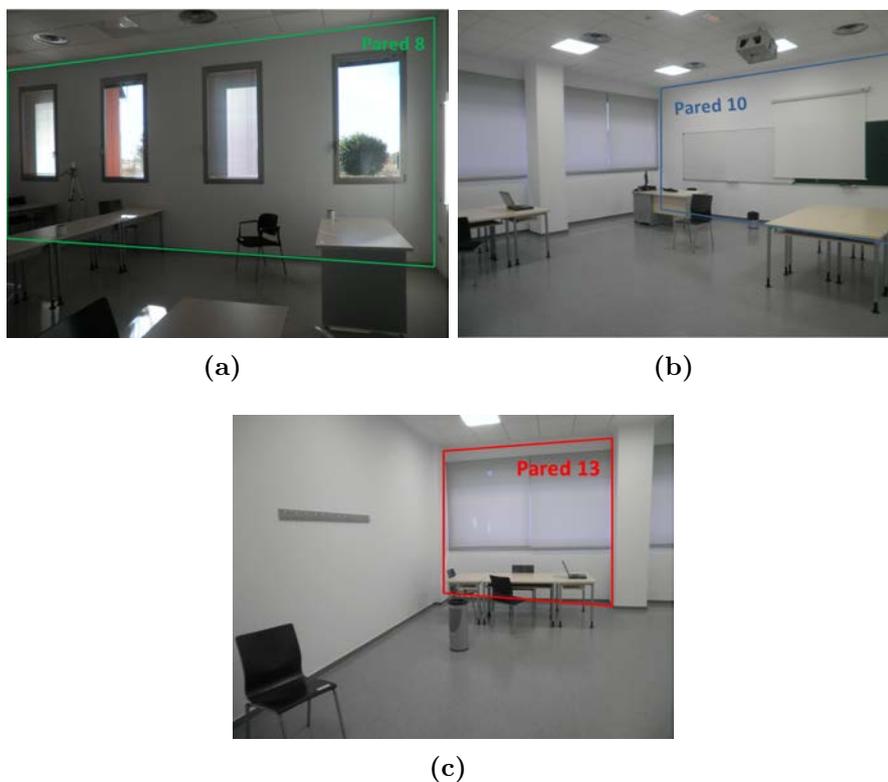


Figura 6.40: Imágenes de paredes significativas del entorno 3. a) Pared 8 del aula 015. b) Pared 10 del aula 011. c) Pared 13 del aula 012.

| | Aula 011 | Aula 012 | Aula 013 | Aula 015 | Aula 016 | Pasillo | Media |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|-------|
| $\bar{d}[cm]$ | 0.85 | 1.15 | 1.15 | 0.87 | 0.96 | 2.91 | 1.32 |

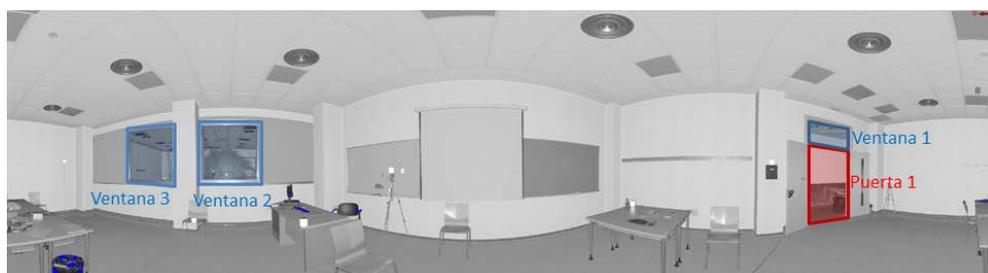
Tabla 6.14: Parámetros calculados para cada par de paredes pertenecientes al entorno 3.

6.4.4.2. Estudio del B-Rep generado

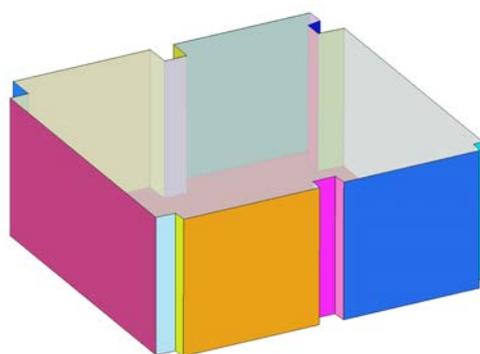
Como en los entornos analizados anteriormente, a partir de las paredes segmentadas de las nubes de puntos 3D, se han generado modelos B-Rep de las aulas y pasillos escaneados. Estos modelos calculados se han comparado con modelos tridimensionales de las habitaciones, los cuales han sido generados a partir de la medición manual de los interiores.

Asimismo, se han estudiado las paredes con el objetivo de identificar los huecos correspondientes a puertas y ventanas.

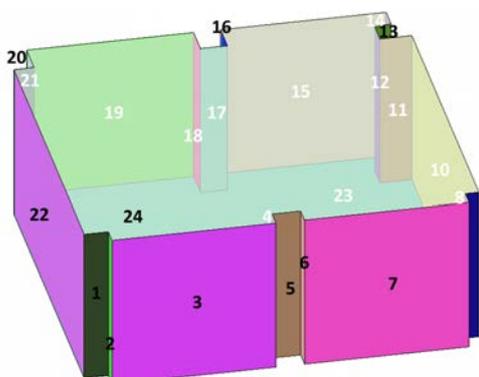
Aula 011 La Figura 6.41 muestra los modelos tridimensionales calculado y *ground truth* para el aula 011.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.41: a) Imagen planar del aula 011. b) Modelo B-Rep obtenido y c) *ground truth*.

En la imagen planar se pueden apreciar los huecos correspondientes a las ventanas y la puerta de la estancia, las cuales son identificadas y posicionadas en el modelo B-Rep como se ilustra en la Figura 6.42.

En la Tabla 6.15 se reflejan las diferencias entre el modelo calculado y el real. La diferencia entre longitudes verticales y horizontales se representan por d_v y d_h respectivamente y la diferencia entre la orientación de las paredes por α .

| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 |
|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| $\alpha[^\circ]$ | 2.71 | 3.23 | 0.02 | 1.79 | 0.08 | 4.32 | 0.18 | 6.39 | 2.20 | 0.03 |
| $d_v[cm]$ | 0 | 0.01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $d_h[cm]$ | 0.75 | 0.01 | 2.83 | 2.99 | 2.96 | 1.72 | 1.56 | 4.49 | 2.96 | 2.47 |
| | P11 | P12 | P13 | P14 | P15 | P16 | P17 | P18 | P19 | P20 |
| $\alpha[^\circ]$ | 2.91 | 9.63 | 12.81 | 1.52 | 0.01 | 0.98 | 0.92 | 1.45 | 0.09 | 0.82 |
| $d_v[cm]$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $d_h[cm]$ | 2.59 | 0.1 | 2.40 | 2.55 | 3.08 | 0.49 | 1.52 | 3.97 | 3.06 | 4.06 |
| | P21 | P22 | P23 | P24 | | | | | | Media |
| $\alpha[^\circ]$ | 2.37 | 0.02 | 0 | 0 | | | | | | 2.27 |
| $d_v[cm]$ | 0 | 0 | - | - | | | | | | <0.01 |
| $d_h[cm]$ | 1.63 | 1.96 | - | - | | | | | | 2.28 |

Tabla 6.15: Desviación media de los datos escaneados del aula 011 a las paredes ajustadas.

Como se extrae de la tabla, los mayores errores en la orientación de las paredes se cometen en aquéllas que son más pequeñas y están más próximas a las esquinas. De estas zonas es más complejo obtener información 3D, por lo que es más difícil calcular la intersección entre muros a la hora de definir el contorno de la habitación, así como es también más complejo aproximar la pared mediante un plano al contar con pocos datos sensados. El error medio cometido en la orientación de las paredes está en torno a los 2° . En cuanto a la diferencia de longitudes entre paredes de los modelos real y calculado, puede apreciarse que ésta es prácticamente despreciable en la dirección vertical y de alrededor de 2 centímetros en la horizontal.

Los errores cometidos en la identificación y posicionamiento de huecos en los muros del aula 011 del entorno 3 se presentan en la Tabla 6.16. La diferencia entre centroides de los huecos reales e identificados d_c es inferior a 6 centímetros en todos los casos. En cuanto al tamaño de los huecos detectados, se cometen errores de hasta 10 centímetros en la dirección vertical d_v para el caso de las

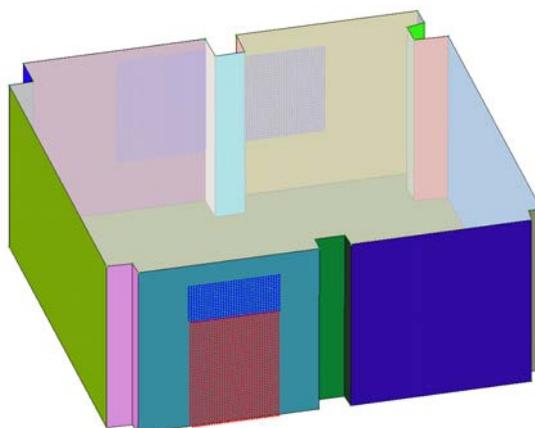


Figura 6.42: Elementos estructurales huecos detectados en el aula 011.

ventanas 2 y 3 y de 6 centímetros en horizontal (d_h) para la puerta y las ventanas 1 y 2.

| | P1 | V1 | V2 | V3 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $d_c[cm]$ | 2.60 | 4.41 | 5.78 | 2.2 |
| $d_v[cm]$ | 1 | 6 | 10 | 10 |
| $d_h[cm]$ | 6 | 6 | 6 | 0.02 |

Tabla 6.16: Parámetros calculados para los elementos estructurales identificados en el aula 011.

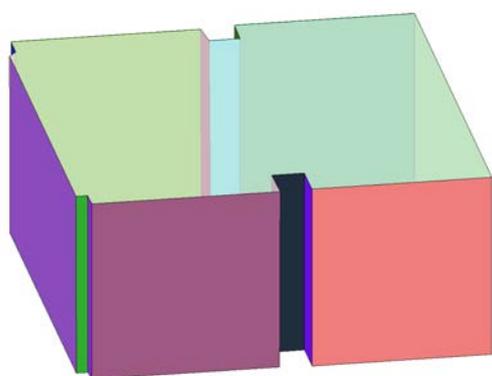
Aula 012 Procediendo de igual manera, se calcula un modelo 3D de la estancia para el aula 012 y se compara con las medidas reales de la habitación. La Figura 6.43 muestra esta reconstrucción.

En la Tabla 6.17 se reflejan los parámetros que comparan los modelos real y calculado para esta aula.

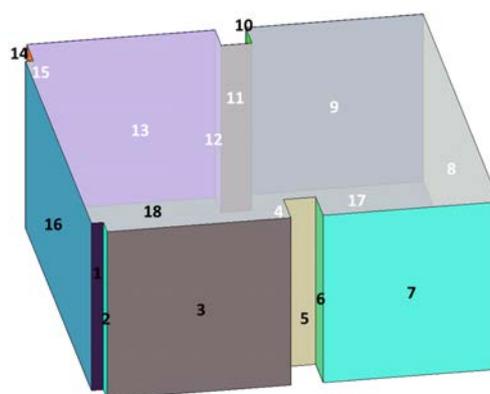
Aunque en la mayoría de las paredes el valor de α está por debajo de 2° , es destacable el error cometido en la pared 15. Este hecho es debido a su reducida anchura, lo que implica pocos puntos 3D que determinen el muro correctamente y que permitan realizar un buen ajuste. En cuanto a los valores d_h están en todos



(a)



(b)



(c)

Figura 6.43: a) Imagen planar del aula 012. b) Modelo *B-Rep* obtenido y c) *ground truth*.

| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 |
|------------------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|
| $\alpha[^\circ]$ | 0.19 | 1.29 | 0.08 | 0.91 | 0.64 | 0.07 | 0.10 | 0.04 | 0.02 | 0.86 |
| $d_v[cm]$ | 0 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0 | 0.01 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $d_h[cm]$ | 0.34 | 1.54 | 2.29 | 0.52 | 0.54 | 0.86 | 2.08 | 1.89 | 0.62 | 0.18 |
| | P11 | P12 | P13 | P14 | P15 | P16 | P17 | P18 | | Media |
| $\alpha[^\circ]$ | 0.31 | 5.40 | 0.01 | 0.43 | 51.20 | 0 | 0 | 0 | | 3.42 |
| $d_v[cm]$ | 0.01 | 0.06 | 0.06 | 0 | 0 | 0 | - | - | | 0.02 |
| $d_h[cm]$ | 9.13 | 4.25 | 9.06 | 8.13 | 7.85 | 1.27 | - | - | | 3.78 |

Tabla 6.17: Desviación media de los datos escaneados del aula 012 a las paredes ajustadas.

los muros por debajo de los 10 centímetros, siendo la media de 3.78 cm. Como en el caso anterior, el valor de d_v es casi nulo.

Como se puede apreciar en la Figura 6.44, las ventanas de las paredes 9 y 13 no han sido identificadas al estar bajadas las persianas.

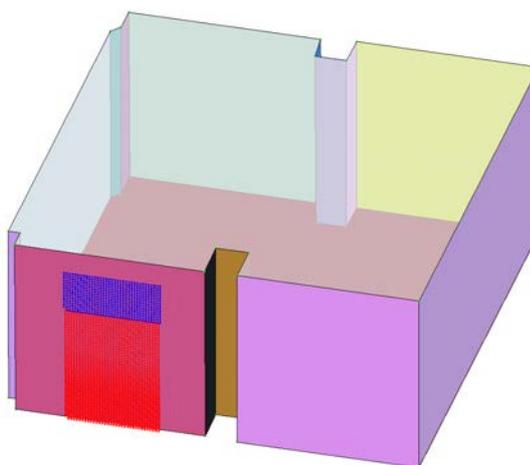


Figura 6.44: Elementos estructurales huecos detectados en el aula 012.

La Tabla 6.18 muestra las desviaciones producidas al posicionar en el modelo *B-Rep* los huecos identificados. Las diferencias entre centroides reales y calculados d_c son inferiores a 7 centímetros y las variaciones en tamaño, tanto vertical como horizontal, son menores que 3.5 cm.

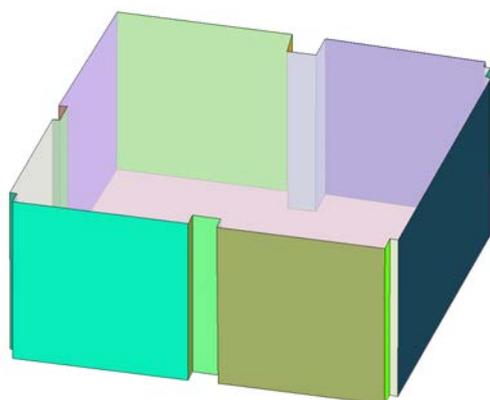
| | P1 | V1 |
|-----------|------|------|
| $d_c[cm]$ | 2.5 | 6.81 |
| $d_v[cm]$ | 0 | 2.8 |
| $d_h[cm]$ | 2.90 | 3.4 |

Tabla 6.18: Parámetros calculados para los elementos estructurales identificados en el aula 012.

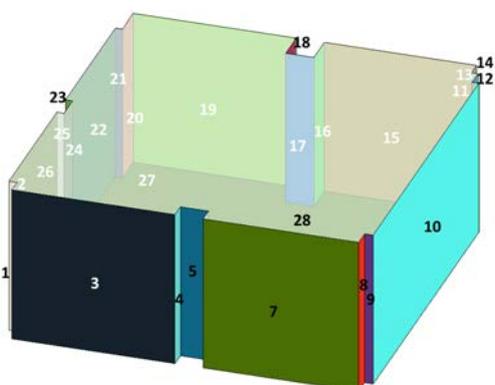
Aula 013 El modelo *B-Rep* obtenido para el aula 013 se muestra en la Figura 6.45. Como puede apreciarse, dos de las ventanas están ocluidas por persianas.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.45: a) Imagen planar del aula 013. b) Modelo *B-Rep* obtenido y c) *ground truth*.

De la Tabla 6.19 se pueden extraer las medidas que comparan el modelo 3D real y el calculado.

Como se puede observar, las paredes 20 y 21 no son detectadas por el algoritmo. Por tanto, la pared 22 se une a la 19, cometándose un error de 70 centímetros en el cálculo de la anchura del muro. Como en casos anteriores, los valores de α son mayores para los casos de paredes estrechas. Los valores de d_h también crecen en el entorno de estas paredes, aumentando o disminuyendo la anchura de estos muros.

Los huecos correspondientes a puertas y ventanas se pueden observar en la Figura 6.46.

| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 |
|------------------|------|-------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|
| $\alpha[^\circ]$ | 4.07 | 1.05 | 0.01 | 2.09 | 1.47 | 2.47 | 0.19 | 1.57 | 2.60 | 0.04 |
| $d_v[cm]$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0 | 0 | 0 |
| $d_h[cm]$ | 0.57 | 2.58 | 0.28 | 3.49 | 0.47 | 4.03 | 2.49 | 1.57 | 3.61 | 0.35 |
| | P11 | P12 | P13 | P14 | P15 | P16 | P17 | P18 | P19 | P20 |
| $\alpha[^\circ]$ | 29.5 | 0.86 | 1.97 | 8.79 | 2.29 | 0.08 | 0.12 | 6.92 | 1.25 | - |
| $d_v[cm]$ | 0 | 0 | 0 | 0.02 | 0.02 | 0 | 0 | 0.02 | 0.01 | - |
| $d_h[cm]$ | 2.51 | 1.69 | 11.92 | 1.61 | 0.60 | 2.24 | 1.60 | 1.52 | 1.88 | - |
| | P21 | P22 | P23 | P24 | P25 | P26 | P27 | P28 | Media | |
| $\alpha[^\circ]$ | - | 1.25 | 4.37 | 0.54 | 2.61 | 0.158 | 0 | 0 | 2.93 | |
| $d_v[cm]$ | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | - | <0.01 | |
| $d_h[cm]$ | - | 71.00 | 0.43 | 0.8 | 1.02 | 3.14 | - | - | 5.05 | |

Tabla 6.19: Desviación media de los datos escaneados del aula 013 a las paredes ajustadas.

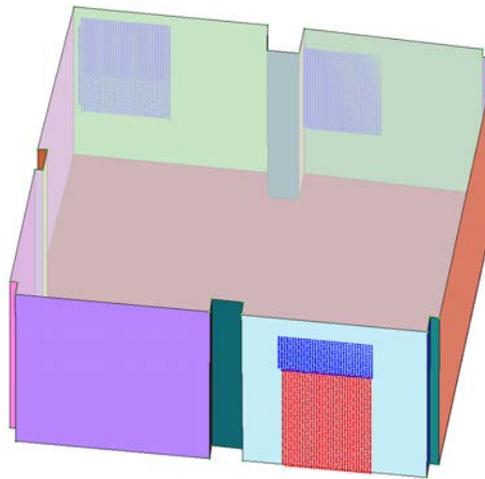


Figura 6.46: Elementos estructurales huecos detectados en el aula 013.

El posicionamiento de estos huecos en el modelo *B-Rep* generado es evaluado a través de los parámetros indicados en la Tabla 6.20. Las diferencias entre centroides, como en casos anteriores, son inferiores a 10 centímetros y los errores en el cálculo del tamaño están por debajo de los 6.5 cm.

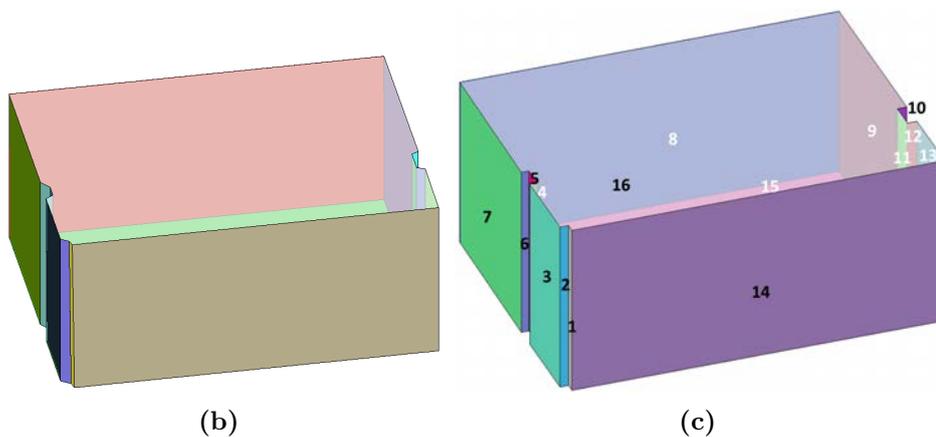
| | P1 | V1 | V2 | V3 |
|-----------|------|------|------|-----|
| $d_c[cm]$ | 1.97 | 9.16 | 4.54 | 5.3 |
| $d_v[cm]$ | 0 | 3.5 | 5 | 0.6 |
| $d_h[cm]$ | 6.5 | 2.2 | 3.4 | 4.3 |

Tabla 6.20: Parámetros calculados para los elementos estructurales identificados en el aula 013.

Aula 015 La Figura 6.47 muestra el modelo *B-Rep* generado a partir de la información 3D obtenida del aula 015.



(a)



(b)

(c)

Figura 6.47: a) Imagen planar del aula 015. b) Modelo *B-Rep* obtenido y c) *ground truth*.

Al igual que ocurre en casos anteriores, la presencia de paredes muy estrechas hace complejo el proceso de identificación del contorno de la habitación. Es por ello que en determinadas paredes (4,6,10 y 12) se cometa un mayor error al ajustar

dichos muros a un plano. Este hecho puede comprobarse en los datos reflejados en la Tabla 6.21. En las paredes estrechas se comete un mayor error al calcular su anchura y su orientación. Los muros estrechos representan una cuarta parte del total, haciendo que la media del parámetro α sea de $12,16^\circ$ y la de d_h de más de 6 centímetros.

| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 |
|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|-----------|-----------|------------|
| $\alpha[^\circ]$ | 13.35 | 35.71 | 0.43 | 32.03 | 1.21 | 54.05 | 0.34 | 0.11 | 0.24 | 25.73 |
| $d_v[cm]$ | 0.04 | 0.04 | 0 | 0 | 0.04 | 0.03 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $d_h[cm]$ | 2.42 | 11.55 | 3.69 | 15.59 | 12.14 | 10.82 | 0.21 | 5.85 | 2.66 | 4.61 |
| | P11 | P12 | P13 | P14 | P15 | P16 | Media | | | |
| $\alpha[^\circ]$ | 0.05 | 30.41 | 0.77 | 0.11 | 0 | 0 | 12.16 | | | |
| $d_v[cm]$ | 0 | 0 | 0 | 0.03 | - | - | 0.01 | | | |
| $d_h[cm]$ | 0.75 | 5.31 | 4.37 | 4.51 | - | - | 6.03 | | | |

Tabla 6.21: Desviación media de los datos escaneados del aula 015 a las paredes ajustadas.

Como en casos anteriores, algunas de las ventanas están ocluidas por persianas, haciendo que no sea posible la detección del hueco correspondiente en el muro. Así, además de la ventana ubicada sobre la puerta, otras dos más son detectadas en la estancia, como se muestra en la Figura 6.48.

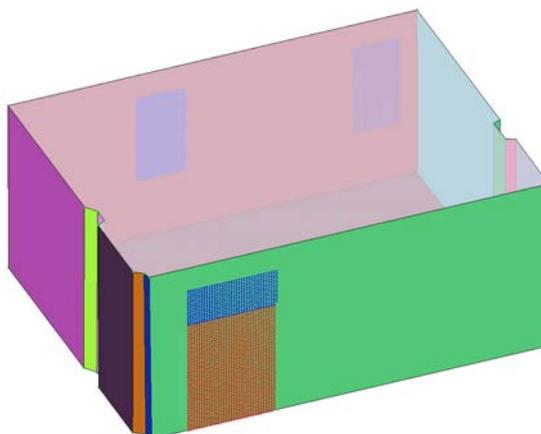


Figura 6.48: Elementos estructurales huecos detectados en el aula 015.

Los errores cometidos en el posicionamiento de estos elementos en el modelo *B-Rep* calculado aparecen reflejados en la Tabla 6.22.

| | P1 | V1 | V2 | V3 |
|-----------|------|------|------|------|
| $d_c[cm]$ | 5.31 | 6.02 | 0.50 | 1.43 |
| $d_v[cm]$ | 1.81 | 2.50 | 2.20 | 3.70 |
| $d_h[cm]$ | 4 | 2 | 8.67 | 1.70 |

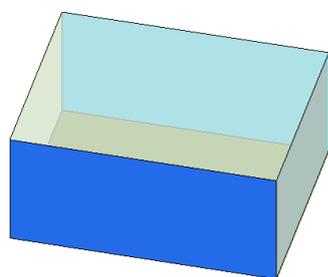
Tabla 6.22: Parámetros calculados para los elementos estructurales identificados en el aula 015.

Como en las estancias evaluadas previamente, el valor de las diferencias entre centroides y de tamaño son inferiores a 10 centímetros en todos los huecos.

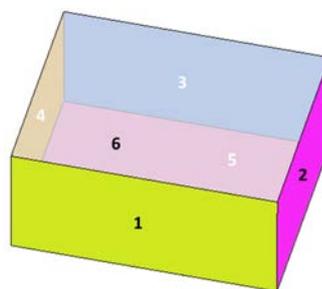
Aula 016 El modelo *B-Rep* generado para la última de las habitaciones, de planta rectangular, se muestra en la Figura 6.49.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.49: a) Imagen planar del aula 016. b) Modelo *B-Rep* obtenido y c) *ground truth*.

Como se aprecia en la Tabla 6.23, este modelo 3D es el que mejor se aproxima al modelo real. La desviación angular de las paredes no supera 1° en ninguno de los muros y las diferencias medias entre tamaños d_h y d_v son inferiores a 1 centímetro.

| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | Media |
|------------------|------|------|------|------|----|----|-------|
| $\alpha[^\circ]$ | 0.11 | 0.09 | 0.09 | 0.07 | 0 | 0 | 0.06 |
| $d_v[cm]$ | 0 | 0 | 0 | 0 | - | - | 0 |
| $d_h[cm]$ | 0.62 | 1.28 | 1.18 | 0.35 | - | - | 0.86 |

Tabla 6.23: Desviación media de los datos escaneados del aula 016 a las paredes ajustadas.

En este caso se han detectado una puerta y dos ventanas, como ilustra la Figura 6.50.

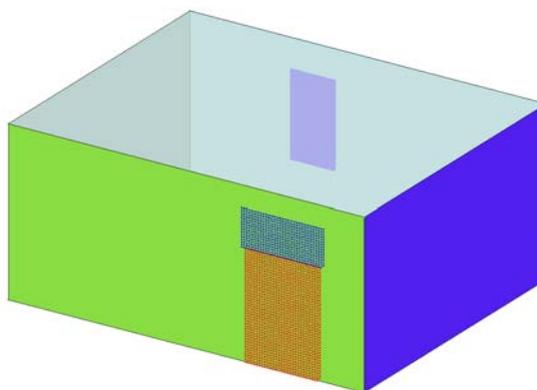


Figura 6.50: Elementos estructurales huecos detectados en el aula 016.

Los parámetros que definen el ajuste de los huecos calculados a los medidos en el escenario se muestran en la Tabla 6.24, siendo todas las desviaciones inferiores a 10 centímetros.

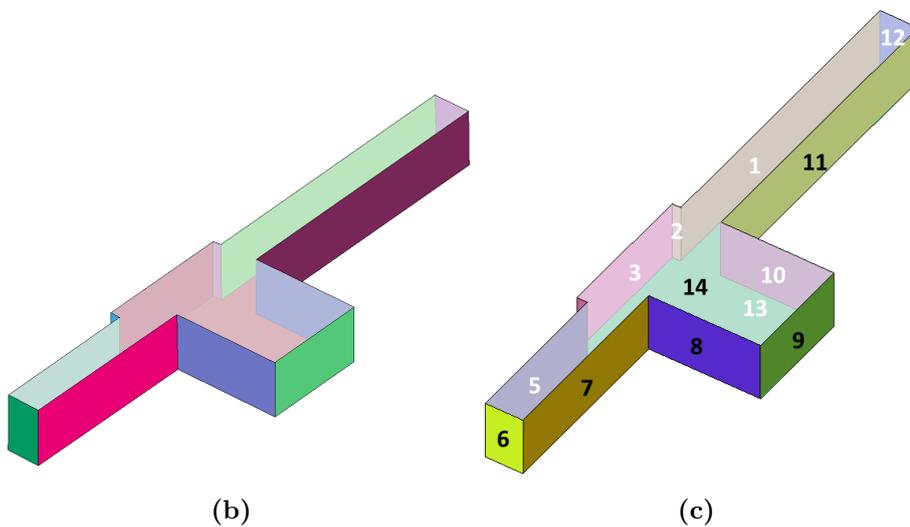
Pasillo Finalmente, se muestra el modelo 3D generado para el pasillo que conecta las aulas de la planta bajo estudio. Como se muestra en la Figura 6.51, el pasillo cuenta con una zona más ancha donde se dispone de mobiliario y de ventanas.

| | P1 | V1 | V2 |
|-----------|------|------|------|
| $d_c[cm]$ | 3.32 | 3.14 | 1.25 |
| $d_v[cm]$ | 1.21 | 5.70 | 9.90 |
| $d_h[cm]$ | 5.20 | 9 | 1.50 |

Tabla 6.24: Parámetros calculados para los elementos estructurales identificados en el aula 016.



(a)



(b)

(c)

Figura 6.51: a) Imagen planar del pasillo. b) Modelo *B-Rep* obtenido y c) *ground truth*.

El ajuste de los diferentes muros del pasillo a los elementos estructurales reales se ha evaluado de forma cuantitativa, como en los casos precedentes, y los resultados se muestran en la Tabla 6.25.

| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 |
|------------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| $\alpha[^\circ]$ | 2.41 | 6.41 | 0 | 3.08 | 0.12 | 2.07 | 0.31 | 0.15 | 0.23 | 0.10 |
| $d_v[cm]$ | 0.05 | 0.01 | 0 | 0 | 0.05 | 0.10 | 0.05 | 0 | 0 | 0 |
| $d_h[cm]$ | 1.96 | 1.92 | 0.45 | 6.01 | 14.57 | 14.15 | 7.85 | 2.95 | 1.42 | 1.14 |
| | P11 | P12 | P13 | P14 | | | | | | Media |
| $\alpha[^\circ]$ | 0.43 | 0.25 | 0 | 0 | | | | | | 1.11 |
| $d_v[cm]$ | 0.07 | 0.11 | - | - | | | | | | 0.04 |
| $d_h[cm]$ | 2.35 | 4.45 | - | - | | | | | | 4.94 |

Tabla 6.25: Desviación media de los datos escaneados del pasillo a las paredes ajustadas.

De nuevo, la anchura de las paredes ha facilitado la generación del modelo *B-Rep*. En este caso, el valor medio de α está en torno a 1 centímetro, y los de d_h y d_v no superan los 5 cm.

Como se menciona previamente, el pasillo cuenta con una serie de ventanas que han sido identificadas de forma automática. Estos elementos se muestran en la Figura 6.52.

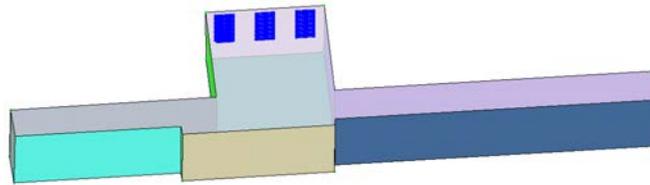


Figura 6.52: Elementos estructurales huecos detectados en el pasillo.

Los resultados del posicionamiento de los elementos estructurales huecos en el pasillo se reflejan en la Tabla 6.26, siendo las desviaciones inferiores a 5 centímetros y las diferencias de tamaño menores de 7 centímetros.

Finalmente, se fusionan todos los modelos generados para crear un modelo *B-Rep* del entorno completo. El modelo tridimensional de la parte sensada del aulario se representa en la Figura 6.53.

| | V1 | V2 | V3 |
|-----------|------|------|------|
| $d_c[cm]$ | 1.10 | 1 | 3.57 |
| $d_v[cm]$ | 6.70 | 3.90 | 2.20 |
| $d_h[cm]$ | 6 | 6 | 1 |

Tabla 6.26: Parámetros calculados para los elementos estructurales identificados en el pasillo.

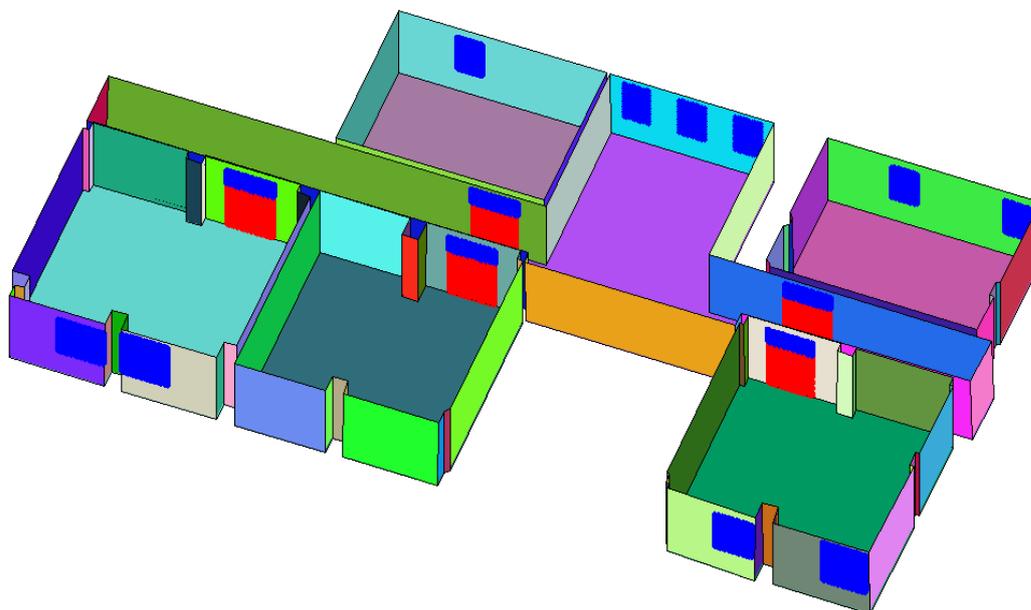
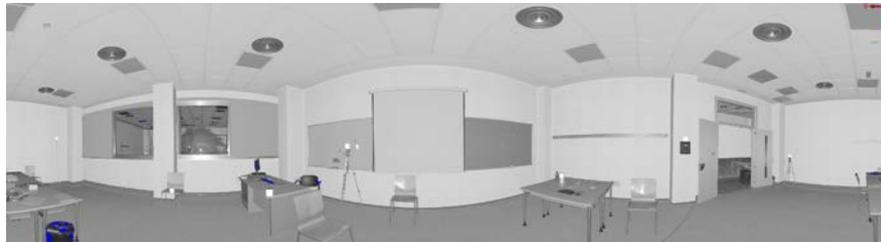


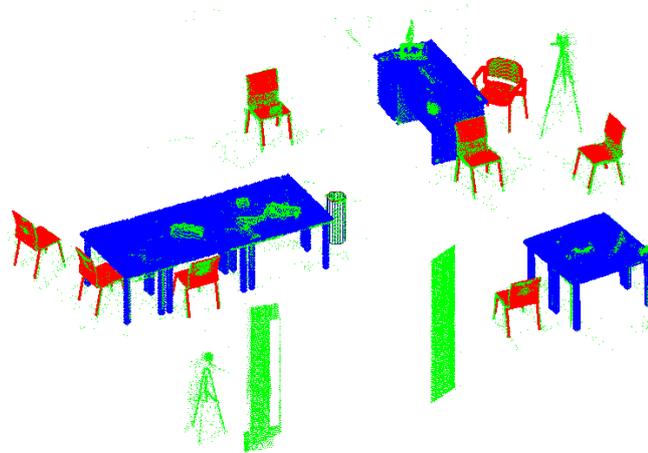
Figura 6.53: Modelo *B-Rep* obtenido para el entorno número 3.

6.4.5. Elementos no permanentes

Una vez determinados los componentes estructurales y generados los modelos *B-Rep* del conjunto de los entornos sensados, se ha llevado a cabo la identificación de los elementos no permanentes presentes en cada escena. En este tercer entorno se han posicionado objetos comúnmente presentes en escenarios académicos. Por lo tanto, se han compuesto diferentes escenas con mesas, sillas y papeleras. Dichos modelos *as-built* se presentan en la Figura 6.54.



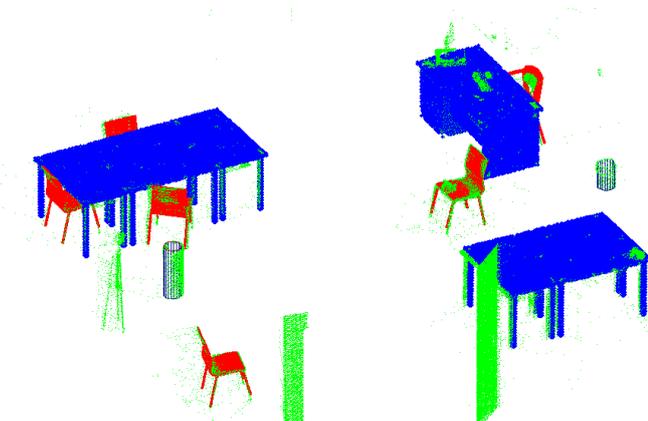
(a)



(b)



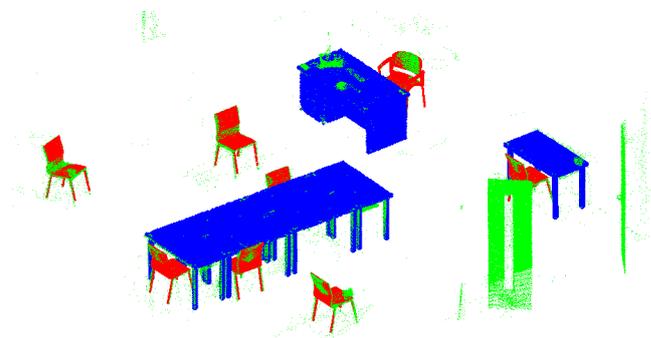
(c)



(d)



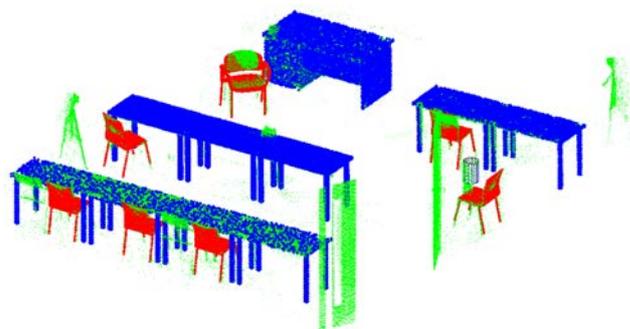
(e)



(f)



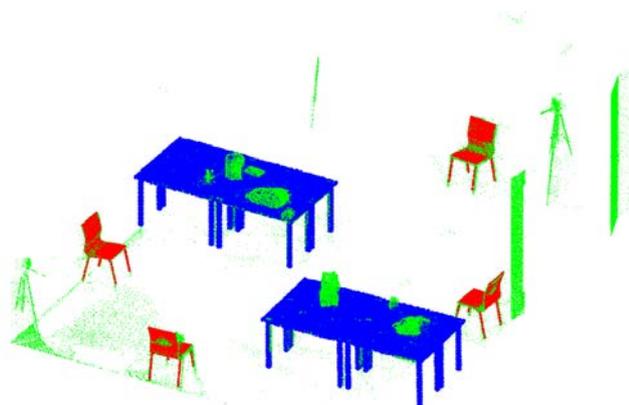
(g)



(h)



(i)



(j)

Figura 6.54: Nubes de puntos y objetos identificados en las aulas escaneadas en la Facultad de Medicina. a) Imagen planar y b) objetos posicionados en el aula 011. c) Imagen planar y d) objetos posicionados en el aula 012. e) Imagen planar y f) objetos posicionados en el aula 013. g) Imagen planar y h) objetos posicionados en el aula 015. i) Imagen planar y j) objetos posicionados en el aula 016.

6.4.5.1. Evaluación de reconocimiento

Después de posicionar los modelos detectados en cada uno de los escenarios, en esta sección se evalúa el reconocimiento de objetos en cada aula. Para ello, se establece una asociación entre pares de puntos del modelo calculado y el real, como se ha realizado en los entornos precedentes. Un porcentaje de datos emparejados superior al 50 % implica una identificación correcta del objeto.

En la Tabla 6.27 se muestran el porcentaje P y la distancia promedio \bar{d} (en centímetros) entre puntos para cada una de las aulas escaneadas. Como en las evaluaciones anteriores: S = silla, A = armario, M = mesa y P = papelera.

| | | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | P1 | P2 | M1 | M2 | M3 | M4 | m |
|---------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| Aula P | | 86.8 | 69.7 | 59.7 | 89.6 | 91.0 | 99.2 | 53.7 | 97.9 | 90.6 | - | 81.7 | 63.1 | 73.6 | - | 78.7 |
| 011 | \bar{d} | 1.86 | 2.29 | 1.61 | 1.68 | 1.85 | 1.30 | 2.29 | 1.63 | 1.65 | - | 2.33 | 2.26 | 1.91 | - | 1.91 |
| Aula P | | 98.0 | 63.6 | 78.1 | 63.5 | 99.8 | 63.6 | - | - | 79.9 | 87.2 | 76.3 | 91.2 | 70.4 | - | 78.3 |
| 012 | \bar{d} | 1.36 | 2.42 | 1.89 | 2.44 | 1.32 | 1.67 | - | - | 1.64 | 2.24 | 1.55 | 1.84 | 1.82 | - | 1.81 |
| Aula P | | 65.5 | 94.0 | 78.0 | 98.7 | 87.3 | 85.1 | 83.4 | 56.1 | - | - | 89.0 | 56.2 | 72.2 | - | 78.7 |
| 013 | \bar{d} | 2.24 | 1.65 | 1.74 | 1.39 | 1.73 | 1.67 | 1.91 | 2.41 | - | - | 1.97 | 2.02 | 1.79 | - | 1.86 |
| Aula P | | 98.6 | 65.9 | 61.5 | 60.4 | 57.9 | 52.3 | 83.1 | - | 85.7 | - | 89.4 | 75.8 | 76.2 | 79.3 | 72.8 |
| 015 | \bar{d} | 1.40 | 1.72 | 2.34 | 2.39 | 2.38 | 2.30 | 1.60 | - | 1.27 | - | 1.64 | 2.16 | 1.73 | 1.69 | 1.94 |
| Aula P | | 99.7 | 99.9 | 97.6 | 81.6 | - | - | - | - | - | - | 82.5 | 83.7 | - | - | 90.9 |
| 016 | \bar{d} | 1.28 | 1.41 | 1.54 | 1.35 | - | - | - | - | - | - | 1.93 | 2.00 | - | - | 1.58 |

Tabla 6.27: Resultados de reconocimiento para cada una de las aulas bajo estudio.

Como se puede apreciar, todos los elementos identificados presentan un porcentaje superior al 50 %. Por tanto, puede decirse que los modelos posicionados en la escena 3D se corresponden con los objetos presentes en el escenario real. Para todas las aulas, se obtienen valores medios superiores al 70 %. En cuanto a las distancias promedio entre puntos, en todos los casos se obtienen valores inferiores a los 2 centímetros.

Los mejores resultados se obtienen para el aula 016. Para esa habitación, el porcentaje de datos emparejados es superior al 90 % y la distancia media entre puntos es de 1.58 centímetros. Por otro lado, los peores resultados se obtienen para el aula 015. En este caso, como se puede comprobar en la Figura 6.54h, existen muchas oclusiones debido a la complejidad de la distribución del mobiliario y la dificultada para posicionar el escáner en zonas estratégicas. Además, hay dos sillas en este entorno que no son identificadas.

6.4.5.2. Evaluación de posicionamiento

Como en los experimentos llevados a cabo en las secciones anteriores, una vez determinada la correcta identificación de los elementos no permanentes en cada escena, se procede a evaluar la precisión del posicionamiento calculado para cada objeto, como se muestra en la Tabla 6.28.

| Obj | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | P1 | P2 | M1 | M2 | M3 | M4 | |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| α | 0.66 | 0.35 | 9.15 | 8.33 | 9.59 | 7.18 | 2.32 | 1.29 | 0.75 | - | 0.26 | 0.06 | 0.74 | - | |
| ϕ | 8.32 | 9.44 | 0.25 | 1.94 | 0.83 | 8.10 | 1.50 | 8.37 | 1.10 | - | 0.01 | 0.77 | 0.48 | - | |
| θ | 0.21 | 2.31 | 0.10 | 3.86 | 1.51 | 4.79 | 3.09 | 0.05 | 0.48 | - | 0.03 | 3.77 | 1.49 | - | |
| Aula m | 3.06 | 4.03 | 3.16 | 4.71 | 3.98 | 6.69 | 2.30 | 3.24 | 0.78 | - | 0.10 | 1.53 | 0.90 | - | |
| 011 | Δx | 2.28 | 1.88 | 1.52 | 4.45 | 4.32 | 4.20 | 5.70 | 7.60 | 0.10 | - | 1.75 | 3.08 | 0.47 | |
| | Δy | 0.36 | 0.92 | 3.00 | 0.94 | 0.53 | 4.71 | 0.48 | 4.36 | 0.07 | - | 0.90 | 2.83 | 0.45 | |
| | Δz | 3.10 | 3.35 | 2.13 | 3.28 | 2.34 | 2.08 | 1.60 | 4.04 | 0.26 | - | 3.63 | 2.27 | 3.80 | |
| | m | 3.56 | 3.72 | 3.88 | 4.55 | 4.06 | 5.33 | 2.59 | 6.99 | 0.14 | - | 2.09 | 2.72 | 1.57 | - |
| α | 3.07 | 0.54 | 9.02 | 10.21 | 0.74 | 3.60 | - | - | 2.98 | 0.08 | 0.39 | 0.19 | 0.61 | - | |
| ϕ | 9.19 | 9.21 | 4.67 | 0.44 | 8.88 | 6.78 | - | - | 0.72 | 0.03 | 0.01 | 0.47 | 0.50 | - | |
| θ | 1.19 | 2.23 | 0.53 | 0.22 | 1.21 | 0.04 | - | - | 3.83 | 2.06 | 0.35 | 0.15 | 0.37 | - | |
| Aula m | 4.48 | 3.99 | 4.74 | 3.62 | 3.61 | 3.48 | - | - | 2.51 | 0.72 | 0.25 | 0.27 | 0.49 | - | |
| 012 | Δx | 1.39 | 6.37 | 0.80 | 0.60 | 0.34 | 4.00 | - | - | 0.04 | 1.66 | 3.47 | 5.66 | 0.13 | - |
| | Δy | 0.79 | 1.13 | 3.42 | 2.58 | 0.18 | 0.50 | - | - | 0.70 | 1.03 | 2.26 | 1.02 | 1.15 | - |
| | Δz | 4.63 | 2.61 | 4.52 | 3.06 | 3.35 | 0.25 | - | - | 0.11 | 1.56 | 4.17 | 0.86 | 0.21 | - |
| | m | 2.27 | 3.37 | 2.91 | 2.08 | 1.29 | 1.59 | - | - | 0.29 | 1.41 | 3.30 | 2.51 | 0.49 | - |
| α | 1.38 | 10.34 | 7.78 | 1.39 | 8.59 | 7.72 | 0.19 | 3.12 | - | - | 0.08 | 0.97 | 0.14 | - | |
| ϕ | 7.45 | 3.41 | 2.25 | 8.93 | 1.30 | 1.06 | 10.57 | 1.78 | - | - | 0.06 | 0.57 | 0.01 | - | |
| θ | 0.29 | 4.00 | 0.43 | 1.07 | 0.64 | 1.76 | 0.41 | 2.95 | - | - | 0.48 | 0.92 | 1.03 | - | |
| Aula m | 3.04 | 5.92 | 3.49 | 3.80 | 3.51 | 3.52 | 3.72 | 2.62 | - | - | 0.21 | 0.82 | 0.39 | - | |
| 013 | Δx | 1.82 | 1.69 | 1.39 | 3.31 | 2.95 | 3.09 | 0.38 | 2.84 | - | - | 0.11 | 1.96 | 0.53 | - |
| | Δy | 0.55 | 1.97 | 2.75 | 0.85 | 1.41 | 2.65 | 0.22 | 1.24 | - | - | 1.02 | 1.39 | 1.21 | - |
| | Δz | 2.83 | 2.25 | 1.87 | 3.15 | 2.48 | 2.86 | 3.38 | 0.84 | - | - | 0.61 | 0.87 | 0.50 | - |
| | m | 1.73 | 1.97 | 2.00 | 2.44 | 2.28 | 2.87 | 1.33 | 1.64 | - | - | 0.58 | 1.41 | 0.75 | - |
| α | 0.71 | 8.70 | 10.92 | 10.25 | 10.48 | 0.34 | 6.73 | - | 0.46 | - | 0.65 | 0.21 | 0.54 | 0.64 | |
| ϕ | 9.33 | 0.37 | 0.47 | 0.49 | 0.05 | 2.60 | 3.55 | - | 1.56 | - | 0.45 | 0.01 | 0.24 | 0.37 | |
| θ | 0.28 | 0.44 | 2.38 | 1.24 | 0.23 | 2.52 | 6.21 | - | 0.54 | - | 0.14 | 0.55 | 0.30 | 1.43 | |
| Aula m | 3.44 | 3.17 | 4.59 | 4.00 | 3.59 | 1.82 | 5.50 | - | 0.86 | - | 0.41 | 0.26 | 0.36 | 0.81 | |
| 015 | Δx | 2.43 | 0.41 | 0.62 | 0.83 | 0.26 | 1.23 | 4.16 | - | 0.08 | - | 5.16 | 3.53 | 2.00 | 1.04 |
| | Δy | 0.39 | 2.12 | 1.99 | 1.11 | 1.60 | 1.08 | 5.04 | - | 0.28 | - | 1.24 | 3.91 | 1.34 | 1.75 |
| | Δz | 3.20 | 2.11 | 2.09 | 2.46 | 2.19 | 0.38 | 3.07 | - | 0.25 | - | 0.83 | 0.58 | 1.13 | 1.67 |
| | m | 2.00 | 1.55 | 1.57 | 1.47 | 1.35 | 0.89 | 4.09 | - | 0.20 | - | 2.41 | 2.68 | 1.50 | 1.49 |
| α | 0.35 | 9.09 | 7.72 | 0.05 | - | - | - | - | - | - | 0.79 | 0.12 | - | - | |
| ϕ | 8.66 | 0.73 | 0.03 | 6.86 | - | - | - | - | - | - | 0.21 | 0.15 | - | - | |
| θ | 0.27 | 4.00 | 1.29 | 1.17 | - | - | - | - | - | - | 0.50 | 0.19 | - | - | |
| Aula m | 3.09 | 4.61 | 3.01 | 2.69 | - | - | - | - | - | - | 0.50 | 0.15 | - | - | |
| 016 | Δx | 1.53 | 2.75 | 2.66 | 2.97 | - | - | - | - | - | 3.74 | 0.01 | - | - | |
| | Δy | 0.15 | 0.35 | 0.73 | 0.31 | - | - | - | - | - | 0.54 | 2.23 | - | - | |
| | Δz | 0.85 | 0.89 | 2.52 | 3.22 | - | - | - | - | - | 2.84 | 3.10 | - | - | |
| | m | 0.84 | 1.33 | 1.97 | 2.17 | - | - | - | - | - | 2.37 | 1.78 | - | - | |

Tabla 6.28: Resultados de posicionamiento para objetos no permanentes en el aulaario.

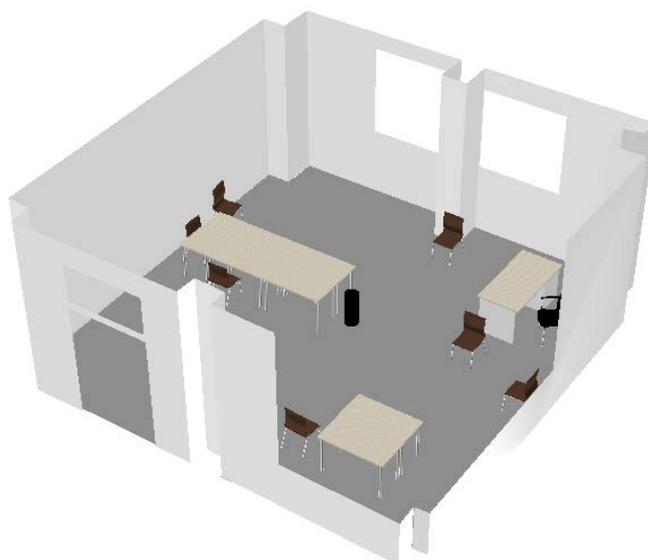
Para ello se ha calculado la matriz de transformación que ajusta cada modelo calculado (o *as-built*) al modelo *ground truth* de cada habitación. De dicha transformación se han extraído los ángulos de rotación (α, ϕ, θ) , medidos en grados, y el vector de traslación $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$, en centímetros, para cada caso. También se muestran los errores promedios (m) para cada uno de ellos.

Como se puede observar en la tabla, la media de los ángulos entre modelos es inferior a 7° para todos los casos. La mayor distancia media entre modelos es 7 centímetros, aunque en la mayoría de los casos este valor está en torno a los 2 centímetros.

Los mejores ajustes se realizan en las papeleras, al ser su geometría más simple. Para estos objetos se obtienen desviaciones angulares inferiores a 1° y desplazamientos de alrededor de 1 centímetro.

6.4.6. Modelos 3D del entorno

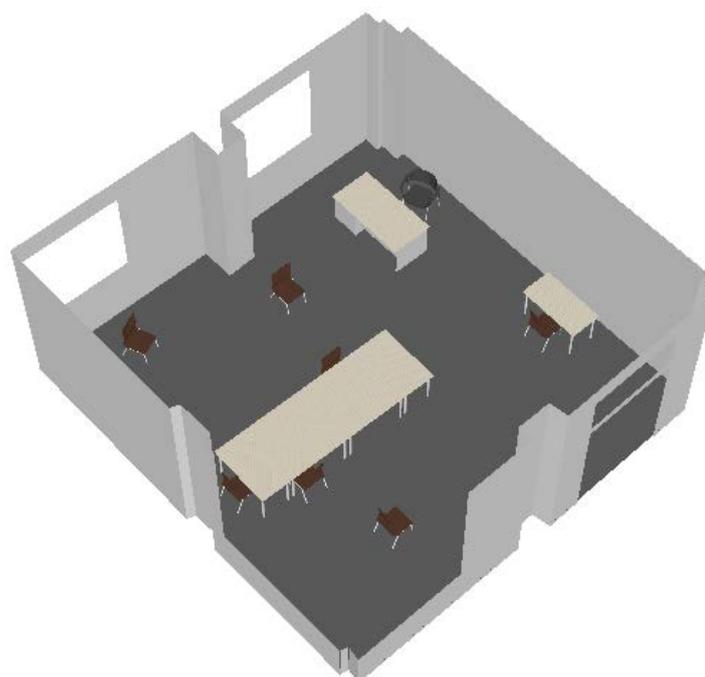
Como en el caso de los entornos anteriores, una vez calculada la posición y la orientación de los diferentes elementos que forman el escenario estudiado, se genera un modelo 3D de cada aula sensada. La Figura 6.55 ilustra los modelos creados para las diferentes estancias del aulario.



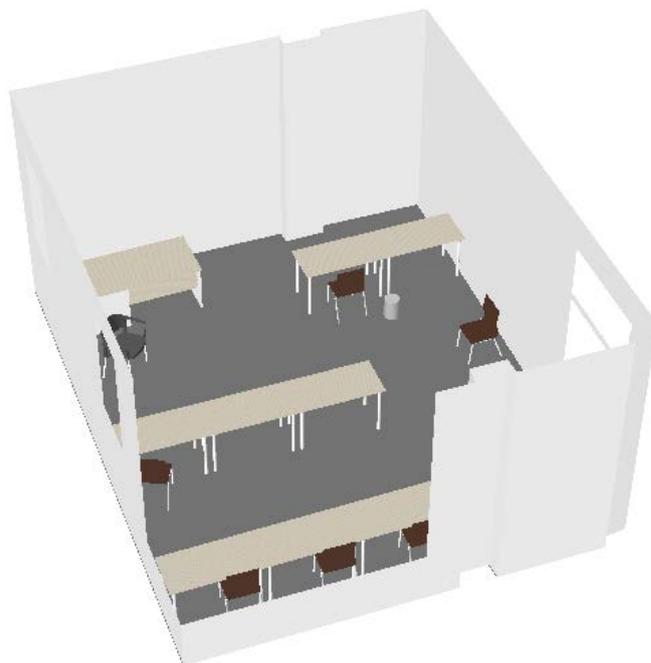
(a)



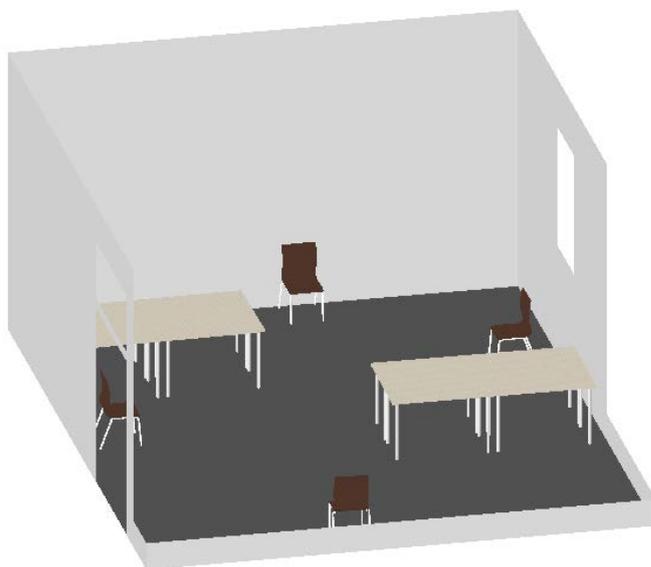
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 6.55: Modelos 3D de las aulas estudiadas en la Facultad de Medicina. a) Aula 011. b) Aula 012. c) Aula 013. d) Aula 015. e) Aula 016.

6.5. Conclusiones del capítulo

Con el objetivo de evaluar las propuestas desarrolladas a lo largo de esta tesis doctoral, en este capítulo se han presentado los resultados obtenidos para una serie de experimentos. Estos experimentos han sido diseñados en diversos entornos habitados reales.

Se han realizado pruebas en diferentes interiores pertenecientes a ambientes distintos. Por una parte, se ha sensado el salón de una vivienda con diferentes configuraciones de mobiliario. Por otra, se han estudiado diferentes espacios en edificios públicos. Así, se han desarrollado experimentos en un laboratorio equipado y diversas aulas provistas de mobiliario.

Para cada uno de estos entornos se ha generado un modelo *B-Rep*, segmentando los muros que forman la estructura y determinando los huecos detectados en los mismos. También se han identificado las columnas presentes en cada escenario. En cuanto a los elementos no permanentes, se han identificado y posicionado los objetos básicos mencionados en el capítulo anterior.

Además, en este capítulo se han presentado los diferentes procesos de adquisición de datos llevados a cabo, así como el preprocesamiento de la información antes de la generación de modelos BIM.

Conclusiones y futuras líneas de investigación

7.1. Conclusiones

La generación automática de modelos de escenarios habitados es un campo de investigación que está siendo estudiado desde diferentes aplicaciones en contextos de arquitectura, construcción y gestión de edificios. En esta tesis doctoral se ha abordado la creación de estos modelos sintéticos desde dos puntos de vista:

- En primer lugar, se ha centrado la atención en el estudio de los elementos estructurales que engloban el escenario. Así, a partir de nubes de puntos obtenidas por escáneres láser, se han segmentado los datos 3D correspondientes a suelos, techos y paredes. El estudio de la relación existente entre estos elementos ha permitido la creación de modelos BIM estructurales, los cuales establecen relaciones topológicas entre cada uno de sus componentes. A estos modelos se han añadido otros componentes que son una parte esencial de la estructura: los huecos en los muros, que suelen corresponderse con los accesos a la estancia (puertas y ventanas, principalmente), y las columnas.
- Por otro lado, se han analizado los componentes denominados “no permanentes”, los cuales pueden variar su posición en el entorno o incluso ser retirados del mismo. Con respecto a este tipo de objetos, se ha orienta-

do el trabajo a la identificación y el posicionamiento de elementos básicos. Estos elementos básicos son aquellos que están presentes en la mayoría de los escenarios correspondientes a interiores habitados, como: sillas, mesas, armarios y papeleras.

Para llevar a cabo el trabajo desarrollado a lo largo de esta tesis doctoral, se han complementado las tecnologías de escáner laser con tecnologías inteligentes, más concretamente, tecnologías RFID. Con el desarrollo de esta tesis, se demuestra que la utilización de etiquetas RFID en la escena proporciona una valiosa información que facilita en gran medida la tarea de segmentación 3D y reconocimiento de objetos. Por otra parte, esto condiciona el uso de algoritmos específicos dirigidos a cada tipo de objeto.

La propuesta presentada en esta tesis permite reconstruir con suficiente precisión modelos semánticos 3D de escenarios complejos en los que se incluyen elementos arquitectónicos y objetos no permanentes habituales. Estos modelos pueden ser de gran utilidad en aplicaciones de navegación autónoma o teledirigida en entornos desconocidos y desordenados en las que se necesite información completa y precisa de la escena.

7.2. Aportaciones de la tesis

A continuación, se detallan las aportaciones más significantes de esta tesis siguiendo el orden establecido en este documento. De una forma esquemática, pueden resumirse en los siguientes puntos:

1. Se ha desarrollado una técnica de trabajo mediante la combinación de dos tecnologías: láser escáner y RFID. Este ámbito de investigación ha sido escasamente explorado con anterioridad.
2. Se ha hecho una completa revisión acerca de las diferentes aplicaciones de las tecnologías inteligentes, especialmente la RFID, en el campo de la construcción. En este sentido, se ha puesto de manifiesto la importancia de

combinar distintas tecnologías con el fin de controlar la evolución de unas obras o de gestionar un edificio habitado.

3. En lo referente a reconocimiento y posicionamiento de elementos estructurales de una escena, se pueden destacar las siguientes aportaciones:
 - Se han establecido procesos de discretización óptima de la nube de puntos obtenida por el escáner láser. Esta *voxelización* ha permitido la segmentación eficiente de los diferentes componentes estructurales de la escena. El desarrollo de un algoritmo adaptativo ha permitido ajustar el tamaño de los vóxeles a la dimensión de los muros que delimitan la estancia, haciendo más preciso el proceso de segmentación.
 - Se ha desarrollado un método que permite la segmentación robusta de las paredes de una sala con independencia de la forma de su planta.
 - Se han generado modelos 3D que contienen información topológica del entorno. Son las denominadas representaciones de frontera (*B-Rep*). A estas representaciones se les ha añadido información adicional de los huecos presentes en dichas paredes y que proceden de puertas y ventanas.
 - Se ha desarrollado un método para identificar el tipo de moldura que rodea los huecos detectados en las paredes (si es el caso), comparando su forma geométrica con los modelos almacenados en una base de datos y añadiendo información al modelo BIM generado.
 - Se han identificado las estructuras correspondientes a las columnas presentes en el escenario. El estudio de su perfil, considerado regular, y su inclinación con la vertical, permiten calcular su posicionamiento en el modelo sintético del entorno.
4. En cuanto a trabajos relativos a la identificación y posicionamiento en la escena de componentes básicos de mobiliario, las principales contribuciones son las siguientes:
 - Se ha llevado a cabo un estudio sobre tecnologías inteligentes, con el fin de obtener información adicional acerca de los elementos “no

permanentes” básicos (mobiliario) presentes en un escenario. Esta información, junto con los datos 3D obtenidos por el escáner láser, hacen posible que el problema de posicionamiento de objetos en la escena sea robusto y preciso. Para desarrollar esta tarea se ha elegido la tecnología RFID, debido a su nivel de desarrollo y su adaptación a los entornos bajo estudio.

- Se ha desarrollado un sistema de gestión de la información almacenada en las etiquetas.
 - Se ha combinado la información extraída de las etiquetas RFID con los datos 3D del entorno, para facilitar la identificación y el posicionamiento de los objetos básicos de mobiliario. A partir de la combinación de estos datos, se han llevado a cabo algoritmos específicos para identificar y posicionar elementos de tipo: silla, mesa, armario y papelera.
5. Se ha desarrollado un proceso automático de alineamiento de varias nubes de puntos, basado en la detección de *landmarks* comunes a escaneos consecutivos.
 6. Se han realizado experimentos en los cuales los sensores láser y RFID se han instalado en un robot móvil. Se ha desarrollado un protocolo de comunicación basado en *sockets*, con el fin de obtener información de los sensores en diferentes posiciones estratégicas del escenario de trabajo, de manera automática, a medida que el robot se desplaza por el entorno.
 7. Como resumen, la aportación general es el desarrollo de una metodología de trabajo con escáneres 3D y sistemas RFID, en la que de forma automática se consigue construir un modelo geométrico 3D que contiene la estructura de contorno de un interior junto con elementos comunes de mobiliario.

7.3. Publicaciones

Los estudios realizados durante el período de desarrollo de esta tesis han dado lugar a diferentes publicaciones en revistas y libros. Otros trabajos han sido

presentados en congresos, tanto nacionales como internacionales, y recogidos en sus actas. Dichas publicaciones son enumeradas a continuación:

- Publicaciones en revistas recogidas en el SCI-JCR
 - *Enrique Valero, Antonio Adán y Carlos Cerrada.* Automatic Method for Building Indoor Boundary Models from Dense Point Clouds Collected by Laser Scanners. *Sensors* 2012, 12(12), 16099-16115.
 - *Ismael Abad, Carlos Cerrada, Jose A. Cerrada, Rubén Heradio y Enrique Valero.* Managing RFID Sensors Networks with a General Purpose RFID Middleware. *Sensors* 2012, 12(6), 7719-7737.
 - *Enrique Valero, Antonio Adán y Carlos Cerrada.* Automatic Construction of 3D Basic-Semantic Models of Inhabited Interiors Using Laser Scanners and RFID Sensors. *Sensors* 2012, 12(5), 5705-5724.
- Publicaciones en congresos y seminarios nacionales
 - *Enrique Valero, Antonio Adán y Carlos Cerrada.* Reconstrucción precisa de interiores con escáner 3D y tecnologías RFID. Actas de las XXXIII Jornadas de Automática. Vigo (España), Septiembre, 2012. ISBN: 978-84-8158-583-4 *Premio a la mejor comunicación en Visión por Computador.*
 - *Enrique Valero, Antonio Adán, Daniel Huber y Carlos Cerrada.* Reconocimiento de molduras en interiores con escáneres. Visión en Robótica. Universidad Rey Juan Carlos, Madrid (España). Octubre, 2010. ISBN: 978-84-693-6777-3.
 - *Carlos Cerrada, José Ignacio Bermejo, Enrique Valero, José Félix Estívariz y Ismael Abad.* Plataforma Experimental para la Navegación Asistida por Etiquetas NFC de un Robot Móvil. Actas de las XXXI Jornadas de Automática. Jaén (España), Septiembre, 2010. ISBN: 978-84-693-0715-1.
 - *Carlos Cerrada, José Ignacio Bermejo, Enrique Valero, José Félix Estívariz y Ismael Abad.* Diseño y Construcción de Robots de Bajo Coste

para Experimentación con Tecnologías RFID. Actas de las XXXI Jornadas de Automática. Jaén (España), Septiembre, 2010. ISBN: 978-84-693-0715-1.

- Publicaciones en congresos nacionales
 - *Enrique Valero, Antonio Adán y Carlos Cerrada*. Building automatic indoor boundary models from dense point clouds. IEEE IV'12. Workshop: Perception in Robotics. Alcalá de Henares (España), Junio, 2012.
 - *Enrique Valero, Antonio Adán y Carlos Cerrada*. Automatic Basic Indoor Model Generation with RFID and 3D Scanner. 5th International Symposium on Ubiquitous Computing and Ambient Intelligent, UCAmI'11. Riviera Maya (México). Diciembre, 2011.
 - *Enrique Valero, Antonio Adán, Daniel Huber y Carlos Cerrada*. Detection, Modeling and Classification of Moldings for Automated Reverse Engineering of Buildings from 3D Data. International Symposium on Automatics and Robotics in Construction, ISARC 2011. Seoul (Korea), Julio, 2011.
 - *Carlos Cerrada, Enrique Valero, Ismael Abad y Jose Cerrada*. 3D-Vision Recognition Assisted by Smart Tags. 5th Annual IEEE International Conference on RFID. Orlando (USA), Abril, 2011.
 - *E. Valero, C. Cerrada, I. Abad, J. Cerrada y A. Adán*. Building an Automatic 3D Vision Recognition System Assisted by Smart Tags. RFID SysTech 2010. European Workshop on Smart Objects: Systems, Technologies and Applications. Ciudad Real (España), Junio, 2010.

7.4. Mejoras y líneas de trabajo futuras

Una vez llevados a cabo los trabajos mencionados en esta memoria, se presenta una serie de mejoras a realizar y un conjunto de futuros trabajos en el ámbito de esta tesis.

1. Ampliación del método desarrollado a formas más complejas de elementos estructurales en general. Por ejemplo: inclusión de techos oblicuos, paredes no planas, huecos no rectangulares, etc.

Este tipo de modelos raramente han sido tratados en la actualidad.

2. Respecto a los elementos no permanentes presentes en el escenario, los avances futuros están dirigidos hacia la mejora de la eficiencia de los algoritmos existentes, haciéndolos más robustos ante situaciones de ruido y especialmente ante falta de datos por oclusión. Por otro lado, se pretende ampliar la tipología de objetos reconocidos, incorporando formas libres (no estrictamente geométricas), incluso deformables. Se podría igualmente incorporar datos relativos al color de los objetos sensados, con el fin de generar modelos 3D más realistas. De hecho, en las etiquetas RFID se introduce información de color de cada uno de los elementos etiquetados.

3. Ampliación del método a otros tipos de entornos. Los entornos estudiados en esta tesis doctoral se corresponden con espacios interiores. Sería interesante trabajar con espacios exteriores que forman parte de los edificios, como: patios, terrazas, etc. Otra posible línea estaría orientada al trabajo en otro tipo de interiores, como pueden ser fábricas u otros entornos de trabajo, donde los espacios son mayores y los elementos no permanentes más complejos.

4. Un reto de mayor complejidad, que involucra a otros agentes y tecnologías, consiste en la automatización completa en la obtención de modelos BIM. En concreto, la automatización se refiere a llevar a cabo la adquisición de datos del entorno de una forma completamente autónoma con un robot móvil. Así, no sería el usuario quien indicara los puntos estratégicos de los que extraer información 3D de la escena, sino que sería el propio sistema quien decidiese las localizaciones óptimas para la toma de datos así como la trayectoria a seguir desde una localización a otra.

En este caso, la presente tesis contribuye a la automatización de la generación del modelo BIM después de obtenidos los datos.

5. El trabajo realizado en esta tesis ha estado liberado de condicionantes de tiempo y de desarrollo. Por lo tanto, un trabajo futuro estaría orientado

a optimizar el sistema e implementarlo en una plataforma de desarrollo adecuada y bajo un lenguaje de programación estándar.

7B |

Conclusions and Future Research

7B.1. Conclusions

3D model generation of inhabited interiors is a challenging field of research which is gaining attention from different applications in Architecture, Engineering, Construction and Facility Management (AEC/FM). This dissertation sets out to investigate the creation of these synthetic models from two different points of view:

- The first viewpoint focuses on the architectural components which are part of the facility structure. The method here proposed is based on segmenting the 3D data corresponding to walls, floors and ceilings. The connection established between these components allows us to create structural BIM models, showing this topological relationship. In order to complete this kind of models, other components which play an important role in the structure, e.g. holes in the walls, are considered in the model. These gaps in the walls correspond to doors and windows.
- The second viewpoint is addressed to extract the so called *non-permanent* objects. These objects can freely move in the scene or even disappear. The research is here focused on identifying and positioning basic pieces of furniture which are located in the most of inhabited interiors, such as: chairs, tables, cabinets and wastepaper baskets.

With the intention of alleviating the segmentation, recognition and positioning of basic components in inhabited interiors, laser scanners and RFID technologies have been combined. However, this approach implies the use of specific algorithms for each kind of object.

The proposal here presented allows us to reconstruct quite precisely 3D semantic models of complex scenarios composed by structural elements and usual *non-permanent* objects. These models can be useful for autonomous or remote-controlled navigation in unknown and untidy environments in which complete and precise scene information is required.

7B.2. Contributions

In this section, the most significant contributions of this dissertation are shown. In a schematic manner, these works are summarized as follows:

1. New 3D recognition and pose solutions, based on the combination of two technologies of a different nature, laser scanners and RFID, have been developed. This research field has scarcely been addressed.
2. A broad review about RFID applications in construction industry is performed. The report points out the existing developments and deals with the integration of RFID technology with other sensors in order to control the evolution of an environment under construction or to manage an inhabited building.
3. Regarding to recognition and positioning of architectural elements in the scene, the points to be underlined are as follows:
 - A new discretization process of the point clouds (acquired by the laser scanner) has been presented. This *voxelization* process allows us to make an efficient segmentation of the main structural components. An adaptative algorithm permits to fit the voxels size to the walls, making more accurate the segmentation process.

- A solution to segment the walls of rooms regardless of their plans has been developed.
 - Accurate 3D models containing topological information of the structure are generated. These models are usually called boundary representations (B-Rep). Additional information, related to the holes within the walls, has been added to the 3D models.
 - In this dissertation, a novel method to identify the moldings which surround a hole corresponding to a door or a window (if it exists) is set. This is a relevant information which is added to the BIM model.
 - The columns present in the scenario have also been identified. The study of their profiles, considered as regular shapes, together with their inclination, allows us to calculate their pose in the scene.
4. With respect to the identification and positioning of basic pieces of furniture (*non-permanent* objects), it is worthy of mention the following points:
- In order to obtain additional information about the *non-permanent* objects located in a scenario, several kinds of smart technologies have been evaluated. This information together with 3D data acquired by the laser scanner make easier the recognition and pose of the objects. Finally, we have chosen RFID technology because of its high level of development and its adaptation to the environments studied in this thesis.
 - A management information system for RFID tags has been developed.
 - By means of 3D data and RFID tags combination, we have carried out specific algorithms for positioning objects as: chairs, tables, cabinets and wastepaper bins.
5. An automatic method to align several point clouds under a unique universal coordinates system has been developed. This solution is based on identifying common 3D landmarks in consecutive scans.
6. Laser scanners and RFID sensors have been boarded on a mobile robot. In order to obtain information from sensors placed in diverse strategical

positions in the studied area, a communication protocol based on sockets has been developed. This data acquisition process is automatically taken as the robot moves in the scene.

7B.3. Publications

This section enumerates the papers related to this thesis. Some of these papers have been published in journals and others have been presented and published in conference or workshop proceedings. These publications are enumerated below:

- Papers published in journals covered by SCI-JCR:
 - *Enrique Valero, Antonio Adán and Carlos Cerrada*. Automatic Method for Building Indoor Boundary Models from Dense Point Clouds Collected by Laser Scanners. *Sensors* 2012, 12(12), 16099-16115.
 - *Ismael Abad, Carlos Cerrada, Jose A. Cerrada, Rubén Heradio and Enrique Valero*. Managing RFID Sensors Networks with a General Purpose RFID Middleware. *Sensors* 2012, 12(6), 7719-7737.
 - *Enrique Valero, Antonio Adán and Carlos Cerrada*. Automatic Construction of 3D Basic-Semantic Models of Inhabited Interiors Using Laser Scanners and RFID Sensors. *Sensors* 2012, 12(5), 5705-5724.
- Papers published in local conferences:
 - *Enrique Valero, Antonio Adán and Carlos Cerrada*. Reconstrucción precisa de interiores con escáner 3D y tecnologías RFID. Proceedings of the XXXIII Jornadas de Automática. Vigo (Spain), September, 2012. ISBN: 978-84-8158-583-4 *Best Paper Award on Computer Vision*. (In Spanish).
 - *Enrique Valero, Antonio Adán, Daniel Huber and Carlos Cerrada*. Reconocimiento de molduras en interiores con escáneres. *Visión en Robótica*. Universidad Rey Juan Carlos, Madrid (Spain). October, 2010. ISBN: 978-84-693-6777-3. (In Spanish).

- *Carlos Cerrada, José Ignacio Bermejo, Enrique Valero, José Félix Estívariz and Ismael Abad.* Plataforma Experimental para la Navegación Asistida por Etiquetas NFC de un Robot Móvil. Proceedings of the XXXI Jornadas de Automática. Jaén (Spain), September, 2010. ISBN: 978-84-693-0715-1 . (In Spanish).
 - *Carlos Cerrada, José Ignacio Bermejo, Enrique Valero, José Félix Estívariz and Ismael Abad.* Diseño y Construcción de Robots de Bajo Coste para Experimentación con Tecnologías RFID. Proceedings of the XXXI Jornadas de Automática. Jaén (Spain), September, 2010. ISBN: 978-84-693-0715-1. (In Spanish).
- Papers published in international conferences and workshops
- *Enrique Valero, Antonio Adán and Carlos Cerrada.* Building automatic indoor boundary models from dense point clouds. IEEE IV'12. Workshop: Perception in Robotics. Alcalá de Henares (Spain), June, 2012.
 - *Enrique Valero, Antonio Adán and Carlos Cerrada.* Automatic Basic Indoor Model Generation with RFID and 3D Scanner. 5th International Symposium on Ubiquitous Computing and Ambient Intelligent, UCAmI'11. Riviera Maya (Mexico). December, 2011.
 - *Enrique Valero, Antonio Adán, Daniel Huber and Carlos Cerrada.* Detection, Modeling and Classification of Moldings for Automated Reverse Engineering of Buildings from 3D Data. International Symposium on Automatics and Robotics in Construction, ISARC 2011. Seoul (Korea), July, 2011.
 - *Carlos Cerrada, Enrique Valero, Ismael Abad and Jose Cerrada.* 3D-Vision Recognition Assisted by Smart Tags. 5th Annual IEEE International Conference on RFID. Orlando (USA), April, 2011.
 - *E. Valero, C. Cerrada, I. Abad, J. Cerrada y A. Adán.* Building an Automatic 3D Vision Recognition System Assisted by Smart Tags. RFID SysTech 2010. European Workshop on Smart Objects: Systems, Technologies and Applications. Ciudad Real (Spain), June, 2010.

7B.4. Future Research and Improvements

Future potential improvements and research lines in the field of the thesis are as follows:

1. Extension of the method in order to evaluate more complex room geometries. For example: inclined ceilings, non-flat walls, non-rectangular holes, etc.

Nowadays, this kind of models has scarcely been tackled.

2. Regarding to the non-permanent components located in the scene, future research is focused on the improvement of the algorithms efficiency and on making them more robust in noisy environments, specially in cases of lack of 3D data and occlusions. On the other hand, it would be worth to extend the method to curve or free-form pieces of furniture. Another interesting idea concerns the use of color information in order to generate more realistic 3D models. Actually, information related to color is stored in RFID tags.
3. A more extended method should be carried out in other scenarios. The environments studied in this dissertation correspond to inhabited interiors. However, other outdoors scenes (as balconies or patios) could also be tackled. Another interesting approach is focused on different interior scenes, as factories or workspaces, with broader spaces and more complex objects and machinery.
4. A challenging approach, involving other agents and technologies, consists in the complete automation of the BIM model creation process. More specifically, the automation refers to carry out the entire data acquisition process in an autonomous manner, by using the mobile robot. Thus, the user does not provide the points where the scanner is placed, but the system itself decides that and then, the mobile robot navigates from one position to the next one.

In this field, this dissertation contributes to the automation of the generation of BIM models after the acquisition of 3D data.

5. Neither time nor development tools requirements have been imposed in this thesis. Therefore, future work will be addressed to optimize the method and implement it in a suitable platform under standard programming languages.

Bibliografía

- [1] E. AARTS. **Ambient intelligence: a multimedia perspective.** *Multimedia, IEEE*, 11(1):12–19, August 2004.
- [2] E. AARTS AND L. APPELO. **Ambient intelligence: thuisomgevingen van de toekomst.** *IT Monitor*, 9/99:7–11, 1999.
- [3] A. ADAN AND D. HUBER. **Reconstruction of Wall Surfaces Under Occlusion and Clutter in 3D Indoor Environments.** Technical Report CMU – RI – TR – 10 – 12, Carnegie Mellon University, 2010.
- [4] A. ADAN AND D. HUBER. **3D Reconstruction of Interior Wall Surfaces under Occlusion and Clutter.** In *2011 International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIM-PVT)*, pages 275 –281, may 2011.
- [5] ANTONIO ADAN AND DANIEL HUBER. **Analisis de Datos 3D Para Generacion Automatica de Modelos BIM de Interiores Habitados.** *Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 8:357 – 370, 2011.
- [6] ANTONIO ADAN, XUEHAN XIONG, BURCU AKINCI, AND DANIEL HUBER. **Automatic Creation of Semantically Rich 3D Building Models from Laser Scanner Data.** In *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, 2011.
- [7] BURCU AKINCI, FRANK BOUKAMP, CHRIS GORDON, DANIEL HUBER, CATHERINE LYONS, AND KUHN PARK. **A formalism for utilization of sensor systems and integrated project models for active construction quality control.** *Automation in Construction*, 15(2):124 – 138, 2006.
- [8] H. ALI, B. AHMED, AND G. PAAR. **Robust Window Detection from 3D Laser Scanner Data.** In *CISP '08: Proceedings of the 2008 Congress on Image and Signal Processing, Vol. 2*, pages 115–118, Washington, DC, USA, 2008. IEEE Computer Society.
- [9] M. ET AL. AMINI. **Simulation Modeling and Analysis: A Collateral Application and Exposition of RFID Technology.** *Production Operations Management*, 16:586–598, 2007.
- [10] ELLI ANGELOPOULOU AND JOHN R. WRIGHT JR. **Laser Scanning Technology.** Technical report, University of Pennsylvania, 1999.
- [11] P. BAHL AND V.N. PADMANABHAN. **RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system.** In *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, 2, pages 775 –784 vol.2, 2000.
- [12] PARAMVIR BAHL AND VENKATA N. PADMANABHAN. **Enhancements to the RADAR User Location and Tracking System.** Technical report, Microsoft Research, 2000.
- [13] J.A. BERARDIN, M. PICARD, S. F. EL-HAKIM, G. GODIN, V. VALZANO, AND C. LATOUCHE. **Virtualizing a Byzantine Crypt by Combining High-resolution Textures with Laser Scanner 3D Data.** In *Proceedings of 8th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia (VSMM2002)*, pages 3–14, 2002.
- [14] P. BESL. **A Method for Registration of 3D Shapes.** *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 14(2), February 1992.
- [15] BO-CHRISTER BJORK. **A unified approach for modelling construction information.** *Building and Environment*, 27(2):173 – 194, 1992. Special Issue Integrated Database and Data Models.
- [16] P.S. BLAER AND P.K. ALLEN. **Two Stage View Planning for Large-Scale Site Modeling.** In *Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, pages 814 –821, june 2006.
- [17] J. BOHM. **Facade Detail from Incomplete Range Data.** In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pages 653–658, 2008.
- [18] J. BOHM, N. HAALA, AND S. BECKER. **Model Refinement by Integrated Processing of Laser Scanning and Photogrammetry.** In *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVI-5/W47, Zurich, Switzerland, July 2007.
- [19] F. BOSCHE. **Automated recognition of 3D CAD model objects in laser scans and calculation of as-built dimensions for dimensional compliance control in construction.** *Advanced Engineering Informatics*, 24(1):107 – 118, 2010. Informatics for cognitive robots.
- [20] F. BOSCHE AND C. T. HAAS. **Automated retrieval of project three-dimensional CAD objects in range point clouds to support automated dimensional QA/QC.** *Journal of Information Technology in Construction (ITCon)*, 13:71–85, 2008.
- [21] FREDERIC BOSCHE. **Plane-based registration of construction laser scans with 3D/4D building models.** *Adv. Eng. Inform.*, 26(1):90–102, January 2012.
- [22] FRANK BOUKAMP AND BURCU AKINCI. **Automated processing of construction specifications to support inspection and quality control.** *Automation in Construction*, 17(1):90 – 106, 2007.

- [23] MUSTAPHA BOUKRAA AND SHIGERU ANDO. **Tag-based vision: assisting 3D scene analysis with radio-frequency tags.** In *ICIP (1)*, pages 269–272, 2002.
- [24] H. BOULAASSAL, T. LANDES, P. GRUSSENMEYER, AND F. TARSHA KURDI. **Automatic Segmentation of Building Facades Using Terrestrial Laser Data.** In *Proceedings of ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*, page 65, 2007.
- [25] C. BRENNKE, O. WULF, AND B. WAGNER. **Using 3D laser range data for SLAM in outdoor environments.** In *2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings.*, 1, pages 188 – 193 vol.1, oct. 2003.
- [26] A. BUDRONI AND J. BOHM. **Toward automatic reconstruction of interiors from laser data.** In *Proceedings of 3D-ARCH*, 2005.
- [27] N. BULUSU, J. HEIDEMANN, AND D. ESTRIN. **GPS-less low-cost outdoor localization for very small devices.** *Personal Communications, IEEE*, 7(5):28 –34, oct 2000.
- [28] C.H. CALDAS, C.T. HAAS, D.G. TORRENT, C.R. WOOD, AND R. PORTER. **Field trials of GPS technology for locating fabricated pipe in laydown yards.** Technical report, FIATECH, Austin, Texas, 2004.
- [29] GULBEN CALIS, SUVIL DEORA, NAN LI, BURCIN BECERIK-GERBER, AND BHASKAR KRISHNAMACHARI. **Assessment of WSN and RFID Technologies for Real-Time Occupancy Information.** In *Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. ISARC 2011*, 2011.
- [30] FRANCOIS CARON, SAIEDEH RAZAVI, JONGCHUL SONG, PHILIPPE VANHEEGHE, EMMANUEL DUFLOS, CARLOS CALDAS, AND CARL HAAS. **Locating sensor nodes on construction projects.** *Autonomous Robots*, 22:255–263, 2007. 10.1007/s10514-006-9720-1.
- [31] U. CASTELLANI, S. LIVATINO, AND R. B. FISHER. **Improving environment modelling by edge occlusion surface completion.** In *In International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission*, 2002.
- [32] C. CERRADA, S. SALAMANCA, A. ADAN, E. PEREZ, J. A. CERRADA, AND I. ABAD. **Improved Method for Object Recognition in Complex Scenes by Fusioning 3-D Information and RFID Technology.** *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 58:3473–3480, 2009.
- [33] S. CHAE. **Development of Warning System for Preventing Collision Accident on Construction Site.** In *Proceedings of the 26th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2009)*, 2009.
- [34] S. CHAE AND N. KANO. **A Location System with RFID Technology in Building Construction Site.** In *Proceedings of the 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2005)*, Ferrara, Italy, September 2005.
- [35] S. CHAE AND T. YOSHIDA. **A Study of Safety Management Using Working Area Information on Construction Site.** In *Proceedings of the 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2008)*, Vilnius, Lithuania, June 2008.
- [36] D. CHAUDHURI AND A. SAMAL. **A Simple Method for Fitting of Bounding Rectangle to Closed Regions.** *Pattern Recognition*, 40:1981–1989, 2007.
- [37] M.Y. CHENG, L.C. LIEN, M.H. TSAI, AND W.N. CHEN. **Open-Building Maintenance Management Using RFID Technology.** In *Proceedings of the 24th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2007)*, 2007.
- [38] CHRISTINE CHEVRIER AND JEAN-PIERRE PERRIN. **Laser Range Data, Photographs and Architectural Components.** *Proceedings of ISPRS*, 2008.
- [39] SANGYOON CHIN, SUWON YOON, CHEOLHO CHOI, AND CHANGYON CHO. **RFID+4D CAD for Progress Management of Structural Steel Works in High-Rise Buildings.** *Journal of Computing in Civil Engineering*, 22:2, 08.
- [40] N. CHOI, H. SON, C. KIM, C. KIM, AND H. KIM. **Rapid 3D Object Recognition for Automatic Project Progress Monitoring Using a Stereo Video System.** In *Proceedings of the 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2008)*, 2008.
- [41] S. CHUMKAMON, P. TUVAPHANTHAPHIPHAT, AND P. KEERATI-WINTAKORN. **A blind navigation system using RFID for indoor environments.** In *5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2008. ECTI-CON 2008*, 2, pages 765 –768, may 2008.
- [42] ZIXIANG CONG, KAI MO, AND KARSTEN MENZEL. **Development of a RFID-Based Building Maintenance System for facility management.** In *Forum Bauinformatik 2011*, 2011.
- [43] J. ET AL. DALTON. **Using RFID Technologies to Reduce Blood Transfusion Errors, White Paper.** 2005.
- [44] R. DE AMORIM SILVA AND P.A. DA S. GONCALVES. **Enhancing the Efficiency of Active RFID-Based Indoor Location Systems.** In *Wireless Communications and Networking Conference, 2009. WCNC 2009. IEEE*, pages 1 –6, april 2009.
- [45] LIVIO DE LUCA, PHILIPPE VERON, AND MICHEL FLORENZANO. **A generic formalism for the semantic modeling and representation of architectural elements.** *The Visual Computer*, 23:181–205, 2007. 10.1007/s00371-006-0092-5.
- [46] F. DELL ACQUA AND R. FISHER. **Reconstruction of planar surfaces behind occlusions in range images.** *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(4):569 –575, apr 2002.
- [47] L. DOHERTY, K.S.J. PISTER, AND L. EL GHAOU. **Convex position estimation in wireless sensor networks.** In *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, 3, pages 1655 –1663 vol.3, 2001.

- [48] KONSTANTINOS DOMDOUZIS, BIMAL KUMAR, AND CHIMAY ANUMBA. **Radio-Frequency Identification (RFID) applications: A brief introduction.** *Advanced Engineering Informatics*, 21(4):350 – 355, 2007.
- [49] P. DORNINGER AND C. NOTHEGGER. **3D Segmentation of Unstructured Point Clouds for Building Modelling.** In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, pages 191–196, 07.
- [50] KRYSZYNA DZIADAK, BIMAL KUMAR, AND JAMES SOMMERVILLE. **Model for the 3D Location of Buried Assets Based on RFID Technology.** *Journal of Computing in Civil Engineering*, 23, 2009.
- [51] S. EL-HAKIM, P. BOULANGER, FRANÇOIS BLAIS, AND J.A. BERARDIN. **A System for Indoor 3-D Mapping and Virtual Environments.** In *SPIE Proceedings: Videometrics V*, 3174, San Diego, California, 1997.
- [52] S. EL-OMARI AND O. MOSELHI. **Integrating Automated Data Acquisition Technologies for Progress Reporting of Construction Projects.** In *Proceedings of the 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2008)*, 2008.
- [53] S. EL-OMARI AND O. MOSELHI. **Integrating automated data acquisition technologies for progress reporting of construction projects.** *Automation in Construction*, 15:3:292–302, 2011.
- [54] ERABUILD. **Review of the current state of Radio Frequency Identification (RFID) Technology, its use and potential future use in Construction.** Technical report, NAES, Tekes, formas and DTI, 2006.
- [55] E. ERGEN AND B. AKINCI. **An Overview of Approaches for Utilizing RFID in Construction Industry.** In *RFID Eurasia, 2007 1st Annual*, pages 1 –5, sept. 2007.
- [56] MARTIN A. FISCHLER AND ROBERT C. BOLLES. **Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography.** *Commun. ACM*, 24(6):381–395, June 1981.
- [57] S. FRIEDMAN AND I. STAMOS. **Real Time Detection of Repeated Structures in Point Clouds of Urban Scenes.** In *3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT), 2011 International Conference on*, pages 220 –227, may 2011.
- [58] CHRISTIAN FRUEH, SIDDHARTH JAIN, AND AVIDEH ZAKHOR. **Data Processing Algorithms for Generating Textured 3D Building Facade Meshes from Laser Scans and Camera Images.** *Int. J. Comput. Vision*, 61(2):159–184, February 2005.
- [59] H. FUMIO, Y. YASUSHI, AND E. SHINICHI. **Development of Digital Photo System Using RFID Technology in Plant Construction Management.** In *Proceedings of the 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2008)*, 2008.
- [60] K.M. FURLANI AND L.E. PFEFFER. **Automated Tracking of Structural Steel Members at the Construction Site.** In *17th IAARC/CIB/IEEE/IFAC/IFR International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 2000.
- [61] G. K. GAJAMANI AND K. VARGHESE. **Automated Project Schedule and Inventory Monitoring Using RFID.** In *Proceedings of the 24th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2007)*, 2007.
- [62] G.H. GOLUB AND C. REINSCH. **Singular Value Decomposition and Least Squares Solutions.** *Numerische Mathematik 10. IV*, 14:403–420, 1970.
- [63] PAUL M. GOODRUM, MATT A. MCLAREN, AND ADAM DURFEE. **The application of active radio frequency identification technology for tool tracking on construction job sites.** *Automation in Construction*, 15(3):292 – 302, 2006.
- [64] D. HAHNEL, W. BURGARD, D. FOX, K. FISHKIN, AND M. PHILIPPOSE. **Mapping and localization with RFID technology.** In *2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04.*, 1, pages 1015–1020 Vol.1, 2004.
- [65] D. HAHNEL, W. BURGARD, D. FOX, AND S. THRUN. **An efficient fast SLAM algorithm for generating maps of large-scale cyclic environments from raw laser range measurements.** In *2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings*, 1, pages 206 – 211 vol.1, oct. 2003.
- [66] FENG HAN, ZHOUWEN TU, AND SONG CHUN ZHU. **A Stochastic Algorithm for 3D Scene Segmentation and Reconstruction.** In *Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision-Part III, ECCV '02*, pages 502–516, London, UK, UK, 2002. Springer-Verlag.
- [67] G. HETZEL, B. LEIBE, P. LEVI, AND B. SCHIELE. **3D object recognition from range images using local feature histograms.** In *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001.*, 2, pages II–394 – II–399 vol.2, 2001.
- [68] J. HIGHTOWER AND G. BORRIELLO. **Location systems for ubiquitous computing.** *Computer*, 34(8):57 –66, aug 2001.
- [69] J. HIGHTOWER, G. BORRIELLO, AND R. WANT. **SpotON: An Indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength.** Technical report, University of Washington, February 2000.
- [70] H. HONTANI, M. NAKAGAWA, T. KUGIMIYA, K. BABA, AND M. SATO. **A Visual Tracking System Using an RFID-tag.** In *Proceedings of SICE Annual Conference*, pages 2720–2723, 2004.
- [71] RONG-YAU HUANG AND TSUNG-YI TSAI. **Development of an RFID System for Tracking Construction Residual Soil in Taiwan.** In *Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. ISARC 2011*, 2011.

- [72] E. J. JASELSKIS AND T. EL-MISALAMI. **Implementing Radio Frequency Identification in the Construction Process.** *Journal of Construction Engineering and Management*, 129, 2003.
- [73] EDWARD J. JASELSKIS, MARY ROSE ANDERSON, CHARLES T. JAHREN, YVAN RODRIGUEZ, AND STEVEN NJOS. **Radio-Frequency Identification Applications in Construction Industry.** *Journal of Construction Engineering and Management*, 121:2, 1995.
- [74] DOMINIK JOHO, CHRISTIAN PLAGEMANN, AND WOLFRAM BURGARD. **Modeling RFID signal strength and tag detection for localization and mapping.** In *In Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 3160–3165, 2009.
- [75] P E JOSEPHSON AND Y HAMMARLUND. **The causes and costs of defects in construction A study of seven building projects.** *Automation in Construction*, 8(6):681–687, 1999.
- [76] HYUN TAE JU, CHI SU SON, KYUNG HUN KIM, KYUNG HWAN KIM, AND JAE JUN KIM. **A study on development of real time monitoring system for field integrated management - overall automation of steel construction -.** In *International Conference on Control, Automation and Systems, 2007. ICCAS '07.*, pages 1937–1941, oct. 2007.
- [77] TOMOYA KANEKO, KOJI HAMADA, AND TETSU KONDO. **Development of Construction Logistics System Using Radio Frequency Identification.** In *Proceedings of the 24th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2007)*, 2007.
- [78] S. KENDALL AND J. TEICHER. *Residential Open Building*. E & FB Spon, London and New York, 2000.
- [79] M.A. KHAN AND V.K. ANTIWAL. **Location Estimation Technique using Extended 3-D LANDMARC Algorithm for Passive RFID Tag.** In *Advance Computing Conference, 2009. IACC 2009. IEEE International*, pages 249–253, march 2009.
- [80] KOUROSH KHOSHELHAM. **Extending Generalized Hough Transform to Detect 3D Objects in Laser Range Data.** In *Proceedings of ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*, pages 206–210, Espoo, Finland, September 2007.
- [81] C. KIM, Y. JU, H. KIM, AND J.H. KIM. **Resource Management in Civil Construction Using RFID Technologies.** In *Proceedings of the 26th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2009)*, pages 105–108, 2009.
- [82] SEMIHA KIZILTAS, BURCU AKINCI, ESIN ERGEN, AND PINGBO TANG. **Technological assessment and process implications of field data capture technologies for construction and facility/infrastructure management.** *ITcon*, 13, Special Issue: Sensors in Construction and Infrastructure Management:134–154, 2008.
- [83] CHIEN-HO KO. **RFID-based building maintenance system.** *Automation in Construction*, 18(3):275 – 284, 2009.
- [84] T. KONDO, S. UCHIDA, T. KANEKO, K. HAMADA, S. MIYAJURA, AND M. OKURA. **Development of RFID-Based Flow Examination System.** In *Proceedings of the 23th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2006)*, 2006.
- [85] V. KULYUKIN, C. GHARPURE, AND J. NICHOLSON. **RoboCart: toward robot-assisted navigation of grocery stores by the visually impaired.** In *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005. (IROS 2005)*, pages 2845 – 2850, aug. 2005.
- [86] SOON-WOOK KWON, FREDERIC BOSCHE, CHANGWAN KIM, CARL T. HAAS, AND KATHERINE A. LIAPI. **Fitting range data to primitives for rapid local 3D modeling using sparse range point clouds.** *Automation in Construction*, 13(1):67 – 81, 2004.
- [87] WEIHONG LI, G. WOLBERG, AND S. ZOKAI. **Lightweight 3D Modeling of Urban Buildings from Range Data.** In *2011 International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIM-PVT)*, pages 124 –131, may 2011.
- [88] MENNO LINDWER, DIANA MARCULESCU, TWAN BASTEN, RAINER ZIMMERMANN, RADU MARCULESCU, STEFAN JUNG, AND EUGENIO CANTATORE. **Ambient Intelligence Visions and Achievements: Linking abstract ideas to real-world concepts.** In *Proceedings of Design Automation & Test in Europe (DATE 2003)*, pages 10–15. Society Press, 2003.
- [89] KONRAD LORINCZ AND MATT WELSH. **MoteTrack: a robust, decentralized approach to RF-based location tracking.** *Personal Ubiquitous Comput.*, 11(6):489–503, August 2007.
- [90] A.M. LÓPEZ, E. PASCUAL, A.M. SALINAS, P. RAMOS, AND G. AZUARA. **Design of a RFID based traceability system in a slaughterhouse.** In *Workshops Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent Environments*, 4, 2009.
- [91] S.S. MANAPURE, H. DARABI, V. PATEL, AND P. BANERJEE. **A comparative study of radio frequency-based indoor location sensing systems.** In *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 2004*, 2, pages 1265 – 1270 Vol.2, 2004.
- [92] B. MENNECKE AND A. TOWNSEND. **Radio Frequency Identification Tagging as a Mechanism of Creating a Viable Producer's Brand in the Cattle Industry.** Technical report, Center for Agricultural and Rural Development (CARD) at Iowa State University, 2005.
- [93] PILAR MERCHAN, ANTONIO ADAN, AND SANTIAGO SALAMANCA. **Recognition of Free-Form Objects in Complex Scenes Using DGI-BS Models.** In *3DPVT '06: Proceedings of the Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT 06)*, pages 970–977, Washington, DC, USA, 2006. IEEE Computer Society.
- [94] ANNALISA MILELLA, GRAZIA CICIRELLI, AND ARCANGELO DISTANTE. **RFID-assisted mobile robot system for mapping and surveillance of indoor environments.** *Industrial Robot: An International Journal*, 35:143–152, 2008.

- [95] SUNGWOO MOON AND BYONGSOO YANG. **Effective Monitoring of the Concrete Pouring Operation in an RFID-Based Environment.** *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24:1, 2010.
- [96] M. MORTENSON. *Geometric Modeling*. John Wiley and Sons, 1985.
- [97] A. MOTAMEDI AND A. HAMMAD. **RFID-Assisted Lifecycle Management of Building Components Using BIM Data.** In *Proceedings of the 26th ISARC*, 2009.
- [98] E.W.T. NGAI, KAREN K.L. MOON, FREDERICK J. RIGGINS, AND CANDACE Y. YI. **RFID research: An academic literature review (1995 - 2005) and future research directions.** *International Journal of Production Economics*, 112(2):510 – 520, 2008. Special Section on RFID: Technology, Applications, and Impact on Business Operations.
- [99] L.M. NI, YUNHAO LIU, YIU CHO LAU, AND A.P. PATIL. **LANDMARC: indoor location sensing using active RFID.** In *Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, 2003. (PerCom 2003)*, pages 407 – 415, march 2003.
- [100] B. OKORN, X. XIONG, B. AKINCI, AND D. HUBER. **Toward Automated Modeling of Floor Plans.** In *Proceedings of the Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission*, 2010.
- [101] ANU PRADHAN, ESIN ERGEN, AND BURCU AKINCI. **Technological Assessment of Radio Frequency Identification Technology for Indoor Localization.** *Journal of Computing in Civil Engineering*, 23:4, 2009.
- [102] SHI PU AND GEORGE VOSSELMAN. **Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data.** *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(6):575 – 584, 2009.
- [103] DANIJEL REBOLJ, NENAD UŠ BABIĆ, ALEŠ MAGDIČ, PETER PODBREZNIK, AND MIRKO PŠUNDER. **Automated construction activity monitoring system.** *Adv. Eng. Inform.*, 22(4):493–503, October 2008.
- [104] F. REMONDINO, S. EL-HAKIM, S. GIRARDI, A. RIZZI, S. BENEDETTI, AND L. GONZO. **3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures.** In *Proceedings of 3D-ARCH 2009*, 2009.
- [105] JOURNAL RFID. **Wal-Mart Details RFID Requirement.** <http://www.rfidjournal.com/article/articleview/642/1/1>, 2003.
- [106] S. RUSINKIEWICZ AND M. LEVOY. **Efficient variant of the ICP algorithm.** In *Proceedings of the 3rd International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, 3DIM 01*, Quebec City, Canada, 2001.
- [107] RADU BOGDAN RUSU, ZOLTAN CSABA MARTON, NICO BLODOW, MIHAI DOLHA, AND MICHAEL BEETZ. **Towards 3D Point cloud based object maps for household environments.** *Robotics and Autonomous Systems*, 56(11):927 – 941, 2008. Semantic Knowledge in Robotics.
- [108] R.B. RUSU, W. MEEUSSEN, S. CHITTA, AND M. BEETZ. **Laser-based perception for door and handle identification.** In *International Conference on Advanced Robotics, 2009. ICAR 2009.*, pages 1 –8, june 2009.
- [109] ANGEL D. SAPPA. **Automatic Extraction of Planar Projections from Panoramic Range Images.** In *Proceedings of the 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, 2nd International Symposium, 3DPVT '04*, pages 231–234, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
- [110] WEIMING SHEN, QI HAO, HELIUM MAK, JOSEPH NEELAMKAVIL, HELEN XIE, JOHN DICKINSON, RUSS THOMAS, AJIT PARDASANI, AND HENRY XUE. **Systems integration and collaboration in architecture, engineering, construction, and facilities management: A review.** *Advanced Engineering Informatics*, 24(2):196 – 207, 2010.
- [111] PENGCHENG SHI, GLYNN ROBINSON, AND JAMES DUNCAN. **Myocardial Motion and Function Assessment Using 4D Images.** In *Proceedings of Visualization in Biomedical Computing, VBC 94*, Rochester, USA, 1994.
- [112] Y.C. SHIAU, J.Y. TSAL, AND S.J. CHENG. **Fire Control in Buildings and the Development of RFID Applications Systems.** In *Proceedings of the 24th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2007)*, 2007.
- [113] MIROSLAW J. SKIBNIEWSKI AND WON-SUK JANG. **Localization Technique for Automated Tracking of Construction Materials Utilizing Combined RF and Ultrasound Sensor Interfaces.** In *Proceedings of Proceeding of the 2007 ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering*, 2007.
- [114] H. SON, C. KIM, H. KIM, K.N. CHOI, AND J.M. JEE. **Real-Time Object Recognition and Modeling for Heavy-Equipment Operation.** In *Proceedings of the 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2008)*, 2008.
- [115] JONGCHUL SONG, CARL T. HAAS, CARLOS CALDAS, ESIN ERGEN, AND BURCU AKINCI. **Automating the task of tracking the delivery and receipt of fabricated pipe spools in industrial projects.** *Automation in Construction*, 15(2):166 – 177, 2006.
- [116] JONGCHUL SONG, CARL T. HAAS, AND CARLOS H. CALDAS. **Tracking the Location of Materials on Construction Job Sites.** *Journal of Construction Engineering and Management*, 132:9, 2006.
- [117] I. STAMOS, GENE YU, G. WOLBERG, AND S. ZOKAI. **3D Modeling Using Planar Segments and Mesh Elements.** In *Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, pages 599 –606, june 2006.
- [118] HARTMUT SURMANN, ANDREAS NUCHTER, AND JOACHIM HERTZBERG. **An autonomous mobile robot with a 3D laser range finder for 3D exploration and digitalization of indoor environments.** *Robotics and Autonomous Systems*, 45(3-4):181 – 198, 2003.

- [119] PINGBO TANG, DANIEL HUBER, BURCU AKINCI, ROBERT LIPMAN, AND ALAN LYTLE. **Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques.** *Automation in Construction*, 19(7):829 – 843, 2010.
- [120] FREDERIC THIESSE, MARKUS DIERKES, AND ELGAR FLEISCH. **LotTrack: RFID-Based Process Control in the Semiconductor Industry.** *IEEE Pervasive Computing*, 5:47–53, 2006.
- [121] H. RANDOLPH THOMAS, VICTOR E. SANVIDO, AND STEVE R. SANDERS. **Impact of Material Management on Productivity - A Case Study.** *Journal of Construction Engineering and Management*, 115:3, 1989.
- [122] S. THRUN, C. MARTIN, YUFENG LIU, D. HAHNEL, R. EMERY-MONTEMERLO, D. CHAKRABARTI, AND W. BURGARD. **A real-time expectation-maximization algorithm for acquiring multiplanar maps of indoor environments with mobile robots.** *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20(3):433 – 443, june 2004.
- [123] CHUN-TA TZENG, YI CHANG CHIANG, CHE MING CHIANG, AND CHI MING LAI. **Combination of radio frequency identification (RFID) and field verification tests of interior decorating materials.** *Automation in Construction*, 18(1):16 – 23, 2008.
- [124] T. UMETANI, Y. MAE, K. INOUE, T. ARAI, AND J. YAGI. **Automated Handling of Construction Components Based on Parts and Packets Unification.** In *Proceedings of the 20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2003)*, 2003.
- [125] ENRIQUE VALERO, ANTONIO ADAN, AND CARLOS CERRADA. **Automatic Construction of 3D Basic-Semantic Models of Inhabited Interiors Using Laser Scanners and RFID Sensors.** *Sensors*, 12(5):5705–5724, 2012.
- [126] F. VAN GASSEL AND G. JANSEN. **A Simulation Tool for Radio Frequency Identification Construction Supply Chains.** In *The 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. ISARC-2008*, 2008.
- [127] G. VOSSELMAN, B. G. H. GORTE, G. SITHOLE, AND T. RABBANI. **Recognising Structures in Laser Scanner Point Clouds.** In *Proceedings of ISPRS*, 2004.
- [128] J. WANG AND M.M. OLIVEIRA. **Improved Scene Reconstruction from Range Images.** *Eurographics*, 21(3):521–530, 2002.
- [129] LUNG-CHUANG WANG. **Enhancing construction quality inspection and management using RFID technology.** *Automation in Construction*, 17(4):467 – 479, 2008.
- [130] ALOYSIUS WEHR AND UWE LOHR. **Airborne laser scanning - an introduction and overview.** *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54:68–82, 1999.
- [131] M.H. WEIER. **Wal-Mart gets trough on RFID.** <http://www.informationweek.com/news/205900561>, 2008.
- [132] J. YAGI. **Robotics Construction in the 21st Century in Japan- IF7II.** In *Proceedings of the 20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2003)*, 2003.
- [133] JUNICHI YAGI, EIJI ARAI, AND TATSUO ARAI. **Parts and packets unification radio frequency identification (RFID) application for construction.** *Automation in Construction*, 14(4):477 – 490, 2005. 20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction: The Future Site.
- [134] HUANG YIHUA, LUI ZONGYUAN, AND LING GUOJUN. **An Improved Bayesian-Based RFID Indoor Location Algorithm.** In *2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering*, 3, pages 511 –514, Dec. 2008.
- [135] SAMUEL Y.L. YIN, H. PING TSEUNG, J.C. WANG, AND S.C. TSAI. **Developing a precast production management system using RFID technology.** *Automation in Construction*, 18(5):677 – 691, 2009.
- [136] S.W. YOON, S. CHIN, Y.S. KIM, AND S.W. KWON. **An Application Model of RFID Technology on Progress Measurement and Management of Construction Works.** In *Proceedings of the 23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2006)*, 2006.
- [137] ZI-NING ZHEN, QING-SHAN JIA, CHEN SONG, AND XIAOHONG GUAN. **An Indoor Localization Algorithm for Lighting Control using RFID.** In *Energy 2030 Conference, 2008. ENERGY 2008. IEEE*, pages 1 –6, nov. 2008.
- [138] JUNYI ZHOU AND JING SHI. **RFID localization algorithms and applications - a review.** *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20:695–707, 2009. 10.1007/s10845-008-0158-5.
- [139] XIAOWEI ZHU, SAMAR K. MUKHOPADHYAY, AND HISASHI KURATA. **A review of RFID technology and its managerial applications in different industries.** *Journal of Engineering and Technology Management*, 29(1):152 – 167, 2012.
- [140] A. ZUREIKI AND M. ROUX. **Ortho-Rectified Facade Image by Fusion of 3D Laser Data and Optical Images.** In *ISPRS Workshop on Laser Scanning*, page 305, 2009.